

MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

DIREZIONE GENERALE RICERCA

PROGETTO DI RICERCA - MODELLO A

BANDO FIRB - PROGRAMMA "FUTURO IN RICERCA"

Anno 2008 - Protocollo: RBFR086WNU

Linea d'intervento 2

1 - Titolo del Progetto di Ricerca

Fusione nucleare controllata tramite polarizzazione degli stati iniziali: studio sperimentale degli effetti di spin in reazioni nucleari di fusione ($d+d$, $d+3He$) di bassa energia.

2 - Durata del Progetto di Ricerca

48 mesi

3 - Coordinatore scientifico della ricerca (Principal Investigator)

CONTALBRIGO	Marco	CNTMRC71T07L157G
(cognome)	(nome)	(Codice Fiscale)
Ricercatore		07/12/1971
(qualifica)		(data di nascita)
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare		
(Istituzione di appartenenza)	(Dipartimento/Istituto/Divisione/Settore)	
0532974308	0532974343	contalbrigo@fe.infn.it
(telefono)	(fax)	(e-mail)

4 - Abstract del Progetto di Ricerca

La dipendenza dalle fonti energetiche non-rinnovabili pone questioni sempre più urgenti e complesse, riguardo alla compatibilità dello sviluppo economico attuale con la salvaguardia dell'ambiente e delle risorse, e riguardo agli equilibri fra paesi importatori ed esportatori di materie prime e fra le società ricche e le economie emergenti. In questo quadro di incertezza sullo sviluppo a lungo termine, si inizia a rivalutare le potenzialità dell'energia nucleare, con particolare interesse per quei procedimenti che assicurino alta sicurezza e basso impatto ambientale.

La fusione nucleare è una fonte di energia idealmente pulita e sicura, la reazione non produce scorie radioattive di lungo corso, non si autoalimenta completamente e non può procedere in assenza di interventi esterni. Rispetto ad un reattore a fissione, ha una probabilità molto inferiore di un evento catastrofico che risulti in un rilascio di radioattività nell'ambiente o di causare danno a persone esterne. Infatti i prodotti di un reattore a fissione continuano a generare calore tramite decadimenti beta per molte ore o anche giorni dopo lo spegnimento del reattore, rendendo possibile la fusione del reattore anche se spento. Al contrario, la fusione richiede condizioni controllate di temperatura, pressione e campi magnetici per generare energia. In caso di danno, questi parametri verrebbero alterati e la produzione di energia cesserebbe molto velocemente. Nei reattori a fusione il processo è così delicato da essere intrinsecamente sicuro e da non richiedere un complesso sistema di controllo. Sebbene il plasma di un reattore di fusione possa avere un volume di 1000 metri cubi o più, la densità è molto bassa e la quantità di combustibile presente è molto piccola (tipicamente pochi grammi). In assenza di fornitura di nuovo combustibile, la reazione cessa in pochi secondi. Al contrario, un reattore di fissione contiene in genere combustibile sufficiente per anni di funzionamento e non è necessario aggiungere combustibile per mantenere la reazione.

Sfortunatamente le difficoltà tecnologiche legate alla fusione nucleare non sono state ancora risolte e si prevedono tempi lunghi, decine di anni, per la costruzione del primo reattore a fusione economicamente conveniente. Con la decisione di costruire ITER (a confinamento magnetico di bassa intensità) e la ricerca continua nella fusione a confinamento inerziale (alta densità) le prospettive per l'energia di fusione potrebbero entrare in una nuova era.

In questo quadro, nuove metodologie che siano in grado di risolvere o aggirare i problemi tecnologici attuali potrebbero accelerare il lungo processo di ottimizzazione ingegneristica dei reattori a fusione. L'idea di fusione polarizzata è stata introdotta già negli anni ottanta: essa offrirebbe alcuni vantaggi rispetto alla fusione non polarizzata, quali l'aumento della velocità di reazione e riduzione del flusso di neutroni.

Per poter quantificare gli eventuali effetti positivi della polarizzazione in processi di fusione nucleare, sono necessari dati sperimentali di grande precisione di correlazioni in spin delle sezioni d'urto di reazioni di fusione di bassa energia: $3H(d,n)4He$ o $3He(d,p)4He$ e reazioni di fusione del deuterio $D(d,p)3H$ e $D(d,n)3He$.

L'interesse per questo tipo di misure è interdisciplinare. Infatti queste reazioni sono importanti per l'astrofisica nucleare e la cosmologia, in quanto corrispondono ai processi di base della nucleosintesi primordiale e dell'evoluzione stellare. Inoltre, gli osservabili di polarizzazione sono utili per verificare i modelli di calcolo teorico sulle reazioni nucleari a multi-corpi.

La configurazione sperimentale richiede fasci e/o bersagli gassosi polarizzati. La misura richiede l'utilizzo di polarimetri per il controllo delle polarizzazioni nello stato iniziale. Le varie componenti sperimentali richieste sono del tutto simili a quelle sviluppate dalla collaborazione PAX e attualmente in uso a Juelich per i test di polarizzazione di fasci tramite spin-filtering. Si sottolinea che Ferrara è l'unico laboratorio in Italia dove è possibile sviluppare una sorgente polarizzata da impiegare in tali studi.

Il progetto prevede la realizzazione di una facility sperimentale per lo studio di reazioni di fusione polarizzate fra elementi leggeri a bassa energia (10-100 keV) e una serie di prime misure.

5 - Parole chiave

- 1. Fusione nucleare polarizzata
- 2. Energia da fusione
- 3. Forze nucleari a multi-corpi
- 4. Nucleosintesi primordiale
- 5. Evoluzione stellare

6 - Settori di ricerca ERC (European Research Council) interessati dal Progetto di Ricerca

PE Mathematics, physical sciences, information and communication, engineering, universe and earth sciences
PE2 Fundamental constituents of matter: high energy, particle, nuclear, plasma, atomic, molecular, gas, and optical physics
PE2_4 Nuclear physics
PE7 Universe science: astro-physics/chemistry/biology/geology; solar system; stellar, galactic and extragalactic astronomy, cosmology; space science, instrumentation
PE7_14 Cosmology
PE2 Fundamental constituents of matter: high energy, particle, nuclear, plasma, atomic, molecular, gas, and optical physics
PE2_5 Gas and plasma physics

7 - Curriculum scientifico

Marco Contalbrigo e' nato il 7/12/1971. Ha conseguito la laurea in Fisica nel 1996 presso l'Universita' degli Studi di Padova con la tesi "Ricerca di neutrini del tau nel fascio di neutrini dell'SPS del CERN".

Nel 1997 ha vinto il premio "Prof. Italo Filosofo" bandito dall'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, per la miglior tesi in Fisica dell'Universita' di Padova ed e' risultato vincitore di una borsa di studio per neulaureati in fisica sperimentale subnucleare dell'INFN. Nel 2001 ha conseguito il titolo di dottore di ricerca in Fisica presso l'Universita' degli Studi di Ferrara con la tesi "Precise measurement of the KL->pi0gg decay". Dal 2001 al 2005 e' stato titolare di assegni di ricerca presso l'Universita' di Perugia e di Ferrara. Dal 2005 e' ricercatore INFN della Sezione di Ferrara.

E' autore di 80 pubblicazioni su riviste internazionali con referee ed ha pubblicato diversi lavori in atti di conferenze internazionali.

Riassunto attivita' scientifica:

Marco Contalbrigo si interessa dello studio sperimentale e della fenomenologia delle interazioni fondamentali delle particelle elementari.

Ha iniziato l'attivita' di ricerca nel campo della fisica elettrodebole con implicazioni cosmologiche, partecipando all'esperimento NOMAD (CERN, Ginevra) per la ricerca di oscillazione di neutrino nell'intervallo di grande massa e all'esperimento NA48 (CERN, Ginevra) per lo studio della violazione di CP nel settore dei kappa neutri.

Dopo il dottorato ha iniziato ad occuparsi della fisica dello spin e della struttura del nucleone. Partecipa all'esperimento HERMES (DESY, Amburgo) per lo studio delle funzioni partoniche del nucleone dipendenti dallo spin: ha coordinato le analisi inclusive e attualmente coordina le analisi sugli effetti di spin trasverso.

E' fra i proponenti dell'esperimento PAX per la fisica con antiprotoni polarizzati. E' vice-responsabile del rivelatore di tracciamento al silicio per gli esperimenti di polarizzazione di fasci di antiprotoni.

Promuove il programma di misure di precisione degli effetti di spin in reazioni di deep-inelastic scattering al Jefferson Lab (Newport News, VA, USA): e' portavoce di uno degli esperimenti recentemente approvati.

Contribuisce allo sviluppo tecnologico delle prestazioni dei bersagli gassosi polarizzati nuclearmente, collaborando con il laboratorio SpinLab dell'Universita' di Ferrara.

Ha partecipato a numerose conferenze internazionali per presentare i suoi risultati. Di seguito sono indicati i suoi contributi piu' recenti:

- *) "Detectors at storage rings" a STORI05, maggio 2005, Juelich-Bonn;
- *) "The PAX Polarized Antiproton eXperiment" a Transversity 2005, settembre 2005, Como;
- *) "Investigation of the Nucleon Spin Structure at HERMES with longitudinally polarized targets" e "Antiproton--Proton Scattering Experiments with Polarization" a Spin-05, ottobre 2005, Dubna, Russia;
- *) "The PAX Polarized Antiproton eXperiment" al XLIV International Winter Meeting on Nuclear Physics, gennaio 2006, Bormio;
- *) "PAX project at FAIR" alla Caucasian-German School and Workshop on Hadron Physics, settembre 2006, Tbilisi, Georgia;
- *) "Measurement of Transverse Asymmetries from Interference Fragmentation at HERMES" a SPIN 2006, ottobre 2006, Kyoto, Giappone;
- *) "Spin Physics at HERMES" a QCD@work 2007, giugno 2007, Martina Franca;
- *) "The status of the PAX project at FAIR" alla The 6th Cirum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, luglio 2007, Vancouver, Canada;
- *) "Transverse Spin Physics at HERMES" a SPIN 2008, ottobre 2008, Charlottesville - VA, USA.

E' fra gli organizzatori ed editori delle conferenze: QCD-N02, aprile 2002 e Transversity 2008, maggio 2008 tenutesi a Ferrara.

8 - Pubblicazioni scientifiche più significative del Coordinatore della Ricerca

n°	Pubblicazione
1.	M. Stancari, L. Barion, M. Capiluppi, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, A. Drago, P. Lenisa, M. Statera, E. Steffens, M. Wang (2008). Low conductance injection tubes for storage cell targets. NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH. SECTION A, ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, vol. 594; p. 126-131, ISSN: 0168-9002, doi: 10.1016/j.nima.2008.06019
2.	M. Stancari, L. Barion, C. Bonomo, M. Capiluppi, CONTALBRIGO M., G. Ciullo, P. F. Dalpiaz, F. Giordano, P. Lenisa, L. Pappalardo, M. Statera, M. Wang (2007). The Impact of Dissociator Cooling on the Beam Intensity and Velocity in the SpinLab ABS. In: Proceedings of the 17th International Spin Physics Symposium. Kyoto (Japan), 2007AIP, vol. 915, p. 992-995
3.	M. Statera, M. Stancari, M. Capiluppi, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, F. Giordano, P. Lenisa, M. Wang (2005). A high intensity Superconducting atomic beam source. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, vol. 15; p. 1164-1166, ISSN: 1051-8223
	S.N. Atutov, L. Barion, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, F. Giordano, P. Lenisa, M. Stancari, M. Statera, L. Tomassetti, M. Wang (2005). Optical

4. spectrometer for measuring the ratio of atomic hydrogen and molecular hydrogen in an ABS. In: 16th international spin physics symposium (SPIN2004). Trieste, 10/10/2004-16/10/2004, Toh tuck Link: World Scientific, p. 820-823
5. M. Stancari, G. Ciullo, S. Atutov, L. Barion, M. Capiluppi, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, F. Giordano, P. Lenisa, M. Statera, M. Wang (2005). Estimates of intra-beam scattering in atomic beam sources. In: 16th international spin physics symposium (SPIN2004). Trieste, 10/10/2004-16/10/2004, Toh Tuk Link: World Scientific Publishing, p. 779-782
6. M. Statera, M. Stancari, V. Carasitti, G. Ciullo, F. Evangelisti, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, P. Lenisa (2006). A Test Bench for Small Multipolar Magnets for a High-Intensity Superconducting Atomic Beam Source. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, vol. 16; p. 297-300, ISSN: 1051-8223
7. M. Statera, M. Capiluppi, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, P. Lenisa, M. Stancari (2007). The Field Mapping at Low Temperature of a NbTi Setupole. In: CRYOPRAGUE 2006 PROCEEDINGS OF ICMC '06, TWENTY FIRST INTERNATIONAL CRYOGENIC ENGINEERING CONFERENCE AND 9TH CRYOGENICS. PRAGA, 17/07/2006 - 21/07/2006, Praga: ICARIS Ltd, vol. 2, p. 199-202
8. CONTALBRIGO M. (2005). Detectors for storage rings. In: Nuclear physics at storage rings. Juelich, 23-26 May 2005, BONN, p. 373-380
9. RATHMANN F, LENISA P, STEFFENS E, CONTALBRIGO M., P. FERRETTI DALPIAZ, KACHARAVA A, LEHRACH A, LORENTZ B, MAIER R, PRASUHN D, STROHER H (2005). A method to polarize stored antiprotons to a high degree. PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 94; p. 014801-1-014801-4, ISSN: 0031-9007
10. V. Barone, B.-Q. Ma, K. Goeke, A. Metz, P. Schweitzer
J. Bisplinghoff, P.D. Eversheim, F. Hinterberger, U.-G. Meissner, H. Rohdness, A. Sibirtsev, C. Montag, W. Vogelsang, U. D'Alesio, F. Murgia, N. Buttmore, A. Efremov, O. Teryaev, S. Dymov, N. Kadagidze, V. Komarov, A. Kulikov, V. Kurbatov, V. Leontiev, G. Macharashvili, S. Merzliakov, I. Meshkov, V. Serdjuk, A. Sidorin, A. Smirnow, E. Syresin, S. Trusov, Y. Uzikov, A. Volkov, N. Zhuravlev, O. Ivanov, V. Krivokhizhin, G. Meshcheryakov, A. Nagaytsev, V. Peshekhonov, A. A. Savin, B. Shaikhatdenov, O. Shevchenko, G. Yarygin, W. Eyrich, A. Kacharava, B. Krauss, A. Lehmann, D. Reggiani, K. Rith, R. Seidel, E. Steffens, F. Stinzinger, P. Tait, S. Yaschenko, M. Capiluppi, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., A. Drago, P. Ferretti-Dalpiaz, F. Giordano, P. Lenisa, L. Pappalardo, G. Stancari, M. Stancari, M. Statera, E. Avetisyan, N. Bianchi, E. De Sanctis, P. Di Nezza, A. Fantoni, C. Hadjidakis, D. Hasch, M. Mirazita, V. Muccifora, F. Ronchetti, P. Rossi, S. Barsov, S. Belostotski, O. Grebenyuk, K. Grigoriev, A. Izotov, A. Jgoun, P. Kravtsov, S. Manaenkov, M. Mikirtychiants, S. Mikirtychiants, O. Miklukho, Y. Naryshkin, A. Vassiliev, A. Zhdanov, D. Ryckbosch, Y. Jiang, H.J. Lu, W.G. Ma, J. Shen, Y.X. Ye, Z.J. Yin, Y.M. Zhang, D. Chladze, R. Gebel, R. Engels, O. Felden, J. Haidenbauer, C. Hanhart, M. Hartmann, I. Keshelashvili, S. Krewald, A. Lehrach, B. Lorentz, S. Martin, U.G. Meissner, N. Nikolaev, D. Prasuhn, F. Rathmann, R. vSchleichert, H. Seyfarth, H. Stroder, D. Bruncko, J. Ferencei, J. Musinsky, J. Urban, C. Wiedner, C. Coriano, M. Guzzi, T. Wise, P. Ratcliffe, V. Baru, A. Gasparyan, V. Grishina, L. Kondratyuk, A. Kudriavtsev, A. Bagulya, E. Devitsin, V. Kozlov, A. Terkulov, M. Zavertiaev, A. Bogdanov, S. Nurusev, V. Okorokov, M. Runtzo, M. Strikhanov, Y. Shatunov, B. Pire, N. Belikov, B. Chujko, Y. Kharlov, V. Korotkov, V. Medvedev, A. Mysnik, A. Prudkoglyad, P. Semenov, S. Troshin, M. Ukhonov, B. Chladze, N. Lomidze, A. Machavariani, M. Nioradze, T. Sakhelashvili, M. Tabidze, I. Trekov, L. Kurdadze, G. Tsirekidze, M. Anselmino, M. Boglione, A. Prokudin, P. Thorgren-Engblom, S. Liuti, W.... (2005). Antiproton-proton scattering experiments with polarization., p. -, High Energy Physics Experiment (hep-ex/0505054).
The document describes the physics case of the PAX experiment using polarized antiprotons, which has recently been proposed for the new Facility for A
11. AIRAPETIAN A, AKOPOV N, AKOPOV Z, AMARIAN M, ANDRUS A, ASCHENAUER EC, AUGUSTYNIAN W, AVAKIAN R, AVETISSIAN A, AVETISSIAN E, BAILEY P, BALIN D, BAUMGARTEN C, BECKMANN M, BELOSTOTSKI S, BIANCHI N, BLOK HP, BOTTCHEH H, BORISSOV A, BORYSENKO A, BOUWHUIS M, BRAUN B, BRULL A, BRYZGALOV V, CAPITANI GP, CAPILUPPI M, CHEN T, CIULLO G, CONTALBRIGO M., COURT G, P. FERRETTI DALPIAZ, DE LEO R, DEMEY M, DE NARDO L, DE SANCTIS E, DEVITSIN E, DI NEZZA P, DUREN M, EHRENFRIED M, ELALAOU-MOULAY A, ELBAKIAN G, ELLINGHAUS F, ELSCHENBROICH U, FABBRI R, FANTONI A, FECHTCHENKO A, FELAWKA L, FRULLANI S, GAPIENKO G, GAPIENKO V, GARIBALDI F, GARROW K, GAVRILOV G, GHARIBYAN V, GRAW G, GREBENIOUK O, GREGOR IM, HADJIDAKIS C, HAEBERLI W, HAFIDI K, HARTIG M, HASCH D, HEESBEEN D, HENOCH M, HERTENBERGER R, HESSELINK WHA, HILLENBRAND A, HOEK M, HOLLER Y, HOMMEZ B, HRISTOVA I, IARYGIN G, IVANILOV A, IZOTOV A, JACKSON HE, JGOUN A, KAISER R, KINNEY E, KISSELEV A, KOBAYASHI T, KOCH N, KOLSTER H, KOPYTIN M, KOROTKOV V, KOZLOV V, KRAUSS B, KRIVOKHIJINE VG, LAGAMBA L, LAPIKAS L, LAZIEVA, LENISA P, LIEBING P, LINDEN-LEVY LA, LORENZON V, LU H, LU J, LU S, MA BQ, MALHEU B, MAKINS NCR, MAO Y, MARIANSKI B, MARUKYAN H, MEXNER V, MEYNNERS N, MUSSA R, MIKLOUKHO O, MILLER CA, MIYACHI Y, MUCCIFORA V, NAGAITSEV A, NAPPY E, NARYSHKIN Y, NASS A, NEGODAIEV M, NOWAK WD, OGANESSYAN K, OHSUGA H, OSBORNE A, PICKERT N, POTTERVELD DH, RAITHEL M, REGGIANI D, REIMER PE, REISCHL A, REOLON AR, RIEDL C, RITH K, ROSNER G, ROSTOMYAN A, RUBACEK L, RUBIN J, RYCKBOSCH D, SALOMATIN Y, SANJIEV I, SAVIN I, SCHILL C, SCHNELL G, SCHULER KP, SEELE J, SEIDL R, SEITZ B, SHANIDZE R, SHEARER C, SHIBATA TA, SHUTOV V, SINRAM K, SOMMER W, STANCARI M, STATERA M, STEFFENS E, STEIJGER JJM, STENZEL H, STEWART J, STINZING F, TAIT P, TANAKA H, TAROIAN S, TCHUIKO B, TERKULOV A, TRZEINSKI A, TYTGAT M, VANDENBROUCKE A, VAN DER NATI P, VAN DER STEENHOVEN G, VAN HAARLEM Y, VETTERLI MC, VIKHROV V, VINCTER MG, VOGEL C, VOLMER J, WANG S, WENDLAND J, WILBERT J, WISE T, SMIT ... (2005). The HERMES polarized hydrogen and deuterium gas target in the HERA electron storage ring. NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH. SECTION A, ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, vol. 540; p. 68-101, ISSN: 0168-9002
12. A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, A. Andrus, E. C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, S. Belostotski, N. Bianchi, H. P. Blok, H. Botthcher, A. Borissov, A. Borysenko, A. Brull, V. Bryzgalov, M. Capiluppi, G. P. Capitani, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P. F. Dalpiaz, W. Deconinck, R. De Leo, M. Demey, L. De Nardo, E. De Sanctis, E. Devitsin, M. Diefenthaler, P. Di Nezza, J. Dreschler, M. Duren, M. Ehrenfried, A. Elalaoi-Moulay, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, R. Fabbri, A. Fantoni, L. Felawka, S. Frullani, A. Funel, D. Gabbert, Y. Garber, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, K. Garrow, G. Gavrilov, V. Gharibyan, F. Giordano, O. Grebeniuk, I. M. Gregor, H. Guler, A. Gute, C. Hadjidakis, M. Hartig, D. Hasch, T. Hasegawa, W. H. A., A. Hillenbrand, M. Hoek, Y. Holler, B. Hommez, I. Hristova, G. Iarygin, A. Ivanilov, A. Izotov, H. E. Jackson, A. Jgoun, R. Kaiser, T. Keri, E. Kinney, A. Kisselev, T. Kobayashi, M. Kopytin, V. Korotkov, V. Kozlov, B. Krauss, P. Kravchenko, V. G. Krivokhijine, L. Lagamba, L. Lapikas, P. Lenisa, P. Liebing, L. A. Linden-Levy, W. Lorenzon, J. Lu, S. Lu, B. Q. Ma, B. Maiheu, N. C. R., Y. Mao, B. Marianski, H. Marukyan, F. Masoli, V. Mexner, N. Meyners, T. Michler, O. Mikloukho, C. A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, M. Murray, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, M. Negodaev, W. D. Nowak, H. Ohsuga, A. Osborne, R. Perez-Benito, N. Pickert, M. Raitchel, D. Reggiani, P. E. Reimer, A. Reischl, A. R. Reolon, C. Riedl, K. Rith, G. Rosner, A. Rostomyan, L. Rubacek, J. Rubin, D. Ryckbosch, Y. Salomatin, I. Sanjiev, I. Savin, A. Schafer, G. Schnell, K. P. Schuler, J. Seele, B. Seitz, C. Shearer, T. A. Shibata, V. Shutov, K. Sinram, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J. J. M., H. Stenzel, J. Stewart, F. Stinzinger, U. Stosslein, J. Streit, P. Tait, H. Tanaka, S. Taroian, B. Tchuiko, A. Terkulov, A. Trzcinski, M. Tytgat, A. Vandenbroucke, P. B. van, G. van der, Y. van Haarlem, D. Veretennikov, V. Vikhrov, C. Vogel, S. Wang, C. Weiskopf, Y. Ye, Z. Ye, S. Yen, B. Zihlmann, P. Zupranski (2007). Precise determination of the spin structure function $g(1)$ of the proton, deuteron, and neutron. PHYSICAL REVIEW D, vol. 75; p. 12007-1-12007-48, ISSN: 0556-2821
13. AIRAPETIAN A, AKOPOV N, AKOPOV Z, AMARIAN M, ANDRUS A, ASCHENAUER EC, AUGUSTYNIAN W, AVAKIAN R, AVETISSIAN A, AVETISSIAN E, BACCHETTA A, BAILEY P, BALIN D, BECKMANN M, BELOSTOTSKI S, BIANCHI N, BLOK HP, BOTTCHEH H, BORISSOV A, BORYSENKO A, BOUWHUIS M, BRULL A, BRYZGALOV V, CAPITANI GP, CAPILUPPI M, CHEN T, CIULLO G, CONTALBRIGO M., P. FERRETTI DALPIAZ, DE LEO R, DEMEY M, DE NARDO L, DE SANCTIS E, DEVITSIN E, DI NEZZA P, DUREN M, EHRENFRIED M, ELALAOU-MOULAY A, ELBAKIAN G, ELLINGHAUS F, ELSCHENBROICH U, FABBRI R, FANTONI A, FECHTCHENKO A, FELAWKA L, FRULLANI S, GAPIENKO G, GAPIENKO V, GARIBALDI F, GARROW K, GAVRILOV G, GHARIBYAN V, GREBENIOUK O, GREGOR IM, HADJIDAKIS C, HAFIDI K, HARTIG M, HASCH D, HENOCH M, HESSELINK WHA, HILLENBRAND A, HOEK M, HOLLER Y, HOMMEZ B, HRISTOVA I, IARYGIN G, ILYICHEVA, IVANILOV A, IZOTOV A, JACKSON HE, JGOUN A, KAISER R, KINNEY E, KISSELEV A, KOBAYASHI T, KOPYTIN M, KOROTKOV V, KOZLOV V, KRAUSS B, KRIVOKHIJINE VG, LAGAMBA L, LAPIKAS L, LAZIEVA, LENISA P, LIEBING P, LINDEN-LEVY LA, LORENZON V, LU H, LU J, LU S, MA BQ, MALHEU B, MAKINS NCR, MAO Y, MARIANSKI B, MARUKYAN H, MASOLI F, MEXNER V, MEYNNERS N, MICHLER T, MIKLOUKHO O, MILLER CA, MIYACHI Y, MUCCIFORA V, NAGAITSEV A, NAPPY E, NARYSHKIN Y, NASS A, NEGODAIEV M, NOWAK WD, OGANESSYAN K, OHSUGA H, OSBORNE A, PICKERT N, POTTERVELD DH, RAITHEL M, REGGIANI D, REIMER PE, REISCHL A, REOLON AR, RIEDL C, RITH K, ROSNER G, ROSTOMYAN A, RUBACEK L, RUBIN J, RYCKBOSCH D, SALOMATIN Y, SANJIEV I, SAVIN I, SCHAFAER A, SCHILL C, SCHNELL G, SCHULER KP, SEELE J, SEIDL R, SEITZ B, SHANIDZE R, SHEARER C, SHIBATA TA, SHUTOV V, SINRAM K, SOMMER W, STANCARI M, STATERA M, STEFFENS E, STEIJGER JJM, STENZEL H, STEWART J, STINZING F, TAIT P, TANAKA H, TAROIAN S, TCHUIKO B, TERKULOV A, TRZCINSKI A, TYTGAT M, VANDENBROUCKE A, VAN DER NAT PB, VAN DER STEENHOVEN G, VAN HAARLEM Y, VETTERLI MC, VIKHROV V, VINCTER MG, VOGEL C, VOLMER J, WANG S, WENDLAND J, WILBERT J, SMIT GY, YE Y, YE Z, YEN S, ZIHLMANN B, ZUPRANSKI P (2005). Single-spin asymmetries in semi-inclusive deep-inelastic scattering on a transversely polarized hydrogen target. PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 94; p. 12002-1-12002-6, ISSN: 0031-9007
14. AIRAPETIAN A, AKOPOV N, AKOPOV Z, AMARIAN M, AMMOISOV VV, ANDRUS A, ASCHENAUER EC, AUGUSTYNIAN W, AVAKIAN R, AVETISSIAN A, AVETISSIAN E, BAILEY P, BALIN D, BATURIN V, BECKMANN M, BELOSTOTSKI S, BERNREUTHER S, BIANCHI N, BLOK HP, BOTTCHEH H,

- BORISSOV A, BORYSENKO A, BOUWHUIS M, BRACK J, BRULL A, BRYZGALOV V, CAPITANI GP, CHEN T, CHIANG HC, CIULLO G., CONTALBRIGO M., P. FERRETTI DALPIAZ, LEO RD, DEMEY M, NARDO LD, SANCTIS ED, DEVITSIN E, NEZZA PD, DRESCHLER J, DUREN M, EHRENFRIED M, ELALAOU-MOULAY A, ELBAKIAN G, ELLINGHAUS F, ELSCHENBROICH U, FABBRI R, FANTONI A, FECHTCHENKO A, FELAWKA L, FOX B, FRULLANI S, GAPIENKO G, GAPIENKO V, GARIBALDI F, GARROW K, GARUTTI E, GASKELL D, GAVRILOV G, GHARIBYAN V, GRAW G, GREBENIOUK O, GREENIAUS LG, GREGOR IM, HAFIDI K, HARTIG M, HASCH D, HEESBEEN D, HENOCHE M, HERTENBERGER R, HESSELINK WHA, HILLENBRAND A, HOEK M, HOLLER Y, HOMMEZ I, IARYGIN G, IVANILOV A, IZOTOV A, JACKSON HE, JGOUN A, KAISER R, KINNEY E, KISSELEV A, KOPYTIN M, KOROTKOV V, KOZLOV V, KRAUSS B, KRIVOKHIIJINE VG, LAGAMBA L, LAPIKAS L, LAZIEV A, LENISA P, LIEBING P, LINDEN-LEVY LA, LIPKA K, LORENZON W, LU H, LU J, LU S, MA BQ, MAIHEU B, MAKINS NCR, MAO Y, MARIANSKI B, MARUKYAN H, MASOLI F, MEXNER V, MEYNER N, MIKLOUKHO O, MILLER CA, MIYACHI Y, MUCCIFORA V, NAGAITSEV A, NAPPI E, NARYSHKIN Y, NASS A, NEGODAEV M, NOWAK WD, OGANESEYAN K, OHSUGA H, PICKERT N, POTASHOV S, POTTERVELD DH, RAITHEL M, REGGIANI D, REIMER PE, REISCHL A, REOLON AR, RIEDL C, RITH K, ROSNER G, ROSTOMYAN A, RUBACEK L, RUBIN J, RYCKBOSCH D, SALOMATIN Y, SANJIEV I, SAVIN I, SCHAFAER A, SCHILL C, SCHNELL G, SCHULER KP, SEELE J, SEIDL R, SEITZ B, SHANIDZE R, SHEARER C, SHIBATA TA, SHUTOV V, SIMANI MC, SINRAM K, STANCARI M, STATERA M, STEFFENS E, STEIJGER JJM, STENZEL H, STEWART J, STINZING F, STOSSLEIN U, TAIT P, TANAKA H, TAROIAN S, TCHUIKO B, TERKULOV A, TKABLADZE A, TRZCINSKI A, TYTGAT M, VANDENBROUCKE A, VAN DER NAT PB, VAN DER STEENHOVEN G, VETTERLI MC, VIKHROV V, VINCTER MG, VOGEL C, VOGT M, VOLMER J, WEISKOPF C, Wendland J., Wilbert J., Ye Y., Ye Z., Yen S., Zihlmann B., Zupranski P. (2005). Measurement of the tensor structure function $b(1)$ of the deuteron. PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 95; p. 242001-1-242001-6, ISSN: 0031-9007
15. A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, A. Andrus, E.C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, S. Belostotski, N. Bianchi, H.P. Blok, H. Böttcher, C. Bonomo, A. Borissov, A. Brüll, V. Bryzgalov, J. Burns, M. Capiluppi, G.P. Capitani, E. Cisan, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, W. Deconinck, R. De Leo, M. Demei, L. De Nardo, E. De Sanctis, M. Diefenthaler, P. Di Nezza, J. Dreschler, M. Düren, M. Ehrenfried, A. Elalaoui-Moulay, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, R. Fabbri, A. Fantoni, L. Felawka, S. Frullani, A. Funel, D. Gabbert, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, G. Gavrilo, V. Gharibyan, F. Giordano, S. Gliske, I.M. Gregor, H. Guler, C. Hadjidakis, D. Hasch, T. Hasegawa, W.H.A. Hesselink, G. Hill, A. Hillenbrand, M. Hoek, Y. Holler, B. Hommez, I. Hristova, G. Iarygin, Y. Imazu, A. Ivanilov, A. Izotov, H.E. Jackson, A. Jgoun, S. Joosten, R. Kaiser, T. Keri, E. Kinney, A. Kisselev, T. Kobayashi, M. Kopytin, V. Korotkov, V. Kozlov, P. Kravchenko, V.G. Krivokhijine, L. Lagamba, R. Lamb, L. Lapik, S. I. Lehmann, P. Lenisa, P. Liebing, L.A. Linden-Levy, A. Lopez Ruiz, W. Lorenzon, S. Lu, X.-R. Lu, B.-Q. Ma, D. Mahon, B. Maiheu, N.C.R. Makins, L. Manfr., Y. Mao, B. Marianski, H. Marukyan, V. Mexner, C.A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, M. Murray, A. Mussgiller, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, A. Nass, M. Negodaev, W.-D. Nowak, A. Osborne, L.L. Pappalardo, R. Perez-Benito, N. Pickert, M. Raithe, D. Reggiani, P.E. Reimer, A. Reischl, A.R. Reolon, C. Riedl, K. Rith, S.E. Rock, G. Rosner, A. Rostomyan, L. Rubacek, J. Rubin, D. Ryckbosch, Y. Salomatin, I. Sanjiev, A. Schäfer, G. Schnell, K.P. Schuler, B. Seitz, C. Shearer, T.-A. Shibata, V. Shutov, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J.J.M. Steijger, H. Stenzel, J. Stewart, F. Stinz, J. Streit, P. Tait, S. Taroian, B. Tchuiko, A. Terkulov, A. Trzcinski, M. Tytgat, A. Vandenbroucke, P.B. van der Nat, G. van der, Y. van Haarlem, C. van Hulse, M. Varanda, D. Veretennikov, V. Vikhrov, I. Vilardi, C. Vogel, S. Wang, S. Yaschenko, H. Ye, Y. Ye, Z. Ye, S. Yen, W. Yu, D. Zeiler, B. Zihlmann, P. Z... (2008). Measurement of parton distributions of strange quarks in the nucleon from charged-kaon production in deep-inelastic scattering on the deuteron. PHYSICS LETTERS. SECTION B, vol. 666; p. 446-450, ISSN: 0370-2693, doi: 10.1016/j.physletb.2008.07090
16. Airapetian A, Akopov N, Akopov Z, Amarian M, Ammosov VV, Andrus A, Aschenauer EC, Augustyniak W, Avakian R, Avetissian A, Avetissian E, Bailey P, Baturin V, Baumgarten C, Beckmann M, Belostotski S, Bernreuther S, Bianchi N, Blok HP, Blumlein J, Böttcher H, Borissov A, Borysenko A, Bouwhuis M, Brack J, Brull A, Bryzgalov V, Capitani GP, Chiang HC, Ciullo G, CONTALBRIGO M., Dalpiaz PF, De Leo R, De Nardo L, De Sanctis E, Devitsin E, Di Nezza P, Duren M, Ehrenfried M, Elalaoui-Moulay A, Elbakian G, Ellinghaus F, Elschenbroich U, Ely J, Fabbri R, Fantoni A, Fechtchenko A, Felawka L, Fox B, Franz J, Frullani S, Gapienko G, Gapienko V, Garibaldi F, Garrow K, Garutti E, Gaskell D, Gavrilo, V. Gharibyan, V. Graw G, Grebeniouk O, Greeniaus LG, Gregor IM, Hafidi K, Hartig M, Hasch D, Heesbeen D, Henoch M, Hertenberger R, Hesselink WHA, Hillenbrand A, Hoek M, Holler Y, Hommez I, Iarygin G, Ivanilov A, Izotov A, Jackson HE, Jgoun A, Kaiser R, Kinney E, Kisselev A, Konigsmann K, Kopytin M, Korotkov V, Kozlov V, Krauss B, Krivokhijine VG, Lagamba L, Lapikas L, Laziev A, Lenisa P, Lindemann T, Linden-Levy LA, Lipka K, Lorenzon W, Lu J, Maiheu B, Makins NCR, Marianski B, Marukyan H, Masoli F, Mexner V, Meyners N, Mikloukho O, Miller CA, Miyachi Y, Muccifora V, Nagaitsev A, Nappi E, Naryshkin Y, Nass A, Negodaev M, Nowak WD, Oganeesyan K, Ohsuga H, Pickert N, Potashov S, Potterveld DH, Raithe, M, Reggiani D, Reimer PE, Reischl A, Reolon AR, Riedl C, Rith K, Rosner G, Rostomyan A, Rubacek L, Rubin J, Ryckbosch D, Salomatin Y, Sanjiev I, Savin I, Scarlett C, Schafer A, Schill C, Schnell G, Schuler KP, Schwind A, Seele J, Seidl R, Seitz B, Shanidze R, Shearer C, Shibata TA, Shutov V, Simani MC, Sinram K, Stancari M, Statera M, Steffens E, Steijger JJM, Stenzel H, Stewart J, Stosslein U, Tait P, Tanaka H, Taroian S, Tchuiko B, Terkulov A, Tkabladze A, Trzcinski A, Tytgat M, Vandenbroucke A, van der Nat P, van der Steenhoven G, Vetterli MC, Vikhrov V, Vinciter MG, Vogel C, Vogt M, Volmer J, Weiskopf C, Wendland J, Wilbert J, Smit GY, Yen S, Zihlmann B, Zohrabian H, Zupranski P (2005). Quark helicity distributions in the nucleon for up, down, and strange quarks from semi-inclusive deep-inelastic scattering. PHYSICAL REVIEW D, vol. 71; p. 012003-1-012003-136, ISSN: 0556-2821
17. AIRAPETIAN A, AKOPOV N, AKOPOV Z, AMARIAN M, AMMOSEV VV, ANDRUS A, ASCHENAUER EC, AUGUSTYNIAN W, AVAKIAN R, AVETISSIAN A, AVETISSIAN E, BAILEY P, BATURIN V, BAUMGARTEN C, BECKMANN M, BELOSTOTSKI S, BERNREUTHER S, BIANCHI N, BLOK HP, BÖTTCHER H, BORISSOV A, BOUWHUIS M, BRACK J, BRULL A, BRYZGALOV V, CAPITANI GP, CHIANG HC, CIULLO G, CONTALBRIGO M., P. FERRETTI DALPIAZ, DE LEO R, DE NARDO L, DE SANCTIS E, DEVITSIN E, DI NEZZA P, DUREN M, EHRENFRIED M, ELALAOU-MOULAY A, ELBAKIAN G, ELLINGHAUS F, ELSCHENBROICH U, ELY J, FABBRI R, FANTONI A, FECHTCHENKO A, FELAWKA L, FOX B, FRANZ J, FRULLANI S, GABER Y, GAPIENKO G, GAPIENKO V, GARIBALDI F, GARROW K, GARUTTI E, GASKELL D, GAVRILOV G, GHARIBYAN V, GRAW G, GREBENIOUK O, GREENIAUS LG, HAFIDI K, HARTIG M, HASCH D, HEESBEEN D, HENOCHE M, HERTENBERGER R, HESSELINK WHA, HILLENBRAND A, HOEK M, HOLLER Y, HOMMEZ I, IARYGIN G, IVANILOV A, IZOTOV A, JACKSON HE, JGOUN A, KAISER R, KINNEY E, KISSELEV A, KONIGSMANN K, KOPYTIN M, KOROTKOV V, KOZLOV V, KRAUSS B, KRIVOKHIIJINE VG, LAGAMBA L, LAPIKAS L, LAZIEV A, LENISA P, LIEBING P, LINDEMANN T, LIPKA K, LORENZON W, LU J, MAIHEU B, MAKINS NCR, MARIANSKI B, MARUKYAN H, MASOLI F, MEXNER V, MEYNER N, MIKLOUKHO O, MILLER CA, MIYACHI Y, MUCCIFORA V, NAGAITSEV A, NAPPI E, NARYSHKIN Y, NASS A, NEGODAEV M, NOWAK WD, OGANESEYAN K, OHSUGA H, ORLANDI G, PICKERT N, POTASHOV S, POTTERVELD DH, RAITHEL M, REGGIANI D, REIMER PE, REISCHL A, REOLON AR, RIEDL C, RITH K, ROSNER G, ROSTOMYAN A, RUBACEK L, RYCKBOSCH D, SALOMATIN Y, SANJIEV I, SAVIN I, SCARLETT C, SCHAFAER A, SCHILL C, SCHNELL G, SCHULER KP, SCHWIND A, SEELE J, SEIDL R, SEITZ B, SHANIDZE R, SHEARER C, SHIBATA TA, SHUTOV V, SIMANI MC, SINRAM K, STANCARI M, STATERA M, STEFFENS E, STEIJGER JJM, STEWART J, STOSSLEIN U, TAIT P, TANAKA H, TAROIAN S, TCHUIKO B, TERKULOV A, TKABLADZE A, TRZCINSKI A, TYTGAT M, VANDENBROUCKE A, VAN DER NAT P, VAN DER STEENHOVEN G, VETTERLI MC, VIKHROV V, VINCTER MG, VISSER J, VOGEL C, VOGT M, VOLMER J, WEISKOPF C, WENDLAND J, WILBERT... (2004). Flavor decomposition of the sea-quark helicity distributions in the nucleon from semiinclusive deep inelastic scattering. PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 92; p. 12005-1-12005-5, ISSN: 0031-9007
18. HERMES collaboration, A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, A. Andrus, E.C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, L. Barion, S. Belostotski, N. Bianchi, H.P. Blok, H. Böttcher, C. Bonomo, A. Borissov, A. Brüll, V. Bryzgalov, J. Burns, M. Capiluppi, G.P. Capitani, E. Cisan, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, W. Deconinck, R. De Leo, M. Demei, L. De Nardo, E. De Sanctis, M. Diefenthaler, P. Di Nezza, J. Dreschler, M. Düren, M. Ehrenfried, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, R. Fabbri, A. Fantoni, L. Felawka, S. Frullani, A. Funel, D. Gabbert, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, G. Gavrilo, V. Gharibyan, F. Giordano, S. Gliske, H. Guler, C. Hadjidakis, D. Hasch, T. Hasegawa, G. Hill, A. Hillenbrand, M. Hoek, Y. Holler, I. Hristova, G. Iarygin, Y. Imazu, A. Ivanilov, A. Izotov, H.E. Jackson, A. Jgoun, S. Joosten, R. Kaiser, T. Keri, E. Kinney, A. Kisselev, M. Kopytin, V. Korotkov, V. Kozlov, P. Kravchenko, V.G. Krivokhijine, L. Lagamba, R. Lamb, L. Lapikas, I. Lehmann, P. Lenisa, L.A. Linden-Levy, W. Lorenzon, S. Lu, X. Lu, B.-Q. Ma, D. Mahon, B. Maiheu, N.C.R. Makins, Y. Mao, B. Marianski, H. Marukyan, C.A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, M. Murray, A. Mussgiller, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, A. Nass, M. Negodaev, W.-D. Nowak, A. Osborne, L.L. Pappalardo, R. Perez-Benito, N. Pickert, M. Raithe, P.E. Reimer, A. Reischl, A.R. Reolon, C. Riedl, K. Rith, S.E. Rock, G. Rosner, A. Rostomyan, L. Rubacek, J. Rubin, A.L. Ruiz, D. Ryckbosch, Y. Salomatin, I. Sanjiev, A. Schäfer, G. Schnell, K.P. Schuler, B. Seitz, C. Shearer, T.-A. Shibata, V. Shutov, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J.J.M. Steijger, H. Stenzel, J. Stewart, F. Stinz, P. Tait, S. Taroian, A. Terkulov, A. Trzcinski, M. Tytgat, A. Vandenbroucke, P.B. van der Nat, G. van der Steenhoven, Y. Van Haarlem, C. Van Hulse, M. Varanda, D. Veretennikov, V. Vikhrov, I. Vilardi, C. Vogel, S. Wang, S. Yaschenko, H. Ye, Z. Ye, S. Yen, W. Yu, D. Zeiler, B. Zihlmann, P. Zupranski (2008). Measurement of azimuthal asymmetries with respect to both beam charge and transverse target polarization in exclusive electroproduction of real photons. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, vol. 06; p. 066-1-066-24, ISSN: 1126-6708, doi: 10.1088/1126-6708/2008/06/066
19. HERMES collaboration, A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, A. Andrus, E.C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, L. Barion, S. Belostotski, N. Bianchi, H.P. Blok, H. Böttcher, C. Bonomo, A. Borissov, A. Brüll, V. Bryzgalov, J. Burns, M. Capiluppi, G.P. Capitani, E. Cisan, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, W. Deconinck, R. De Leo, M. Demei, L. De Nardo, E. De Sanctis, M. Diefenthaler, P. Di Nezza, J. Dreschler, M. Düren, M. Ehrenfried, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, R. Fabbri, A. Fantoni, L. Felawka, S. Frullani, A. Funel, D. Gabbert, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, G. Gavrilo, V. Gharibyan, F. Giordano, S. Gliske, H. Guler, C. Hadjidakis, D. Hasch, T. Hasegawa, G. Hill, A. Hillenbrand, M. Hoek, Y. Holler, I. Hristova, G. Iarygin, Y. Imazu, A. Ivanilov, A. Izotov, H.E. Jackson, A. Jgoun, S. Joosten, R. Kaiser, T. Keri, E. Kinney, A. Kisselev, M. Kopytin, V. Korotkov, V.

- Kozlov, P. Kravchenko, V.G. Krivokhijine, L. Lagamba, R. Lamb, L. Lapikás, I. Lehmann, P. Lenisa, L.A. Linden-Levy, W. Lorenzon, S. Lu, X. Lu, B.-Q. Ma, D. Mahon, B. Maiheu, N.C.R. Makins, Y. Mao, B. Marianski, H. Marukyan, C.A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, M. Murray, A. Mussgiller, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, A. Nass, M. Negodaev, W.-D. Nowak, A. Osborne, L.L. Pappalardo, R. Perez-Benito, N. Pickert, M. Raithel, P.E. Reimer, A. Reischl, A.R. Reolon, C. Riedl, K. Rith, S.E. Rock, G. Rosner, A. Rostomyan, L. Rubacek, J. Rubin, A.L. Ruiz, D. Ryckbosch, Y. Salomatin, I. Sanjiev, A. Schäfer, G. Schnell, K.P. Schüller, B. Seitz, C. Shearer, T.-A. Shibata, V. Shutov, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J.J.M. Steijger, H. Stenzel, J. Stewart, F. Stinzing, P. Tait, S. Taroian, A. Terkulov, A. Trzcinski, M. Tytgat, A. Vandenbroucke, P.B. van der Nat, G. van der Steenhoven, Y. van Haarlem, C. van Hulse, M. Varanda, D. Veretennikov, V. Vikhrov, I. Vilardi, C. Vogel, S. Wang, S. Yaschenko, H. Ye, Z. Ye, S. Yen, W. Yu, D. Zeiler, B. Zihlmann and P. Zupranski (2008). Evidence for a transverse single-spin asymmetry in lepton production of $\pi^+\pi^0$ pairs. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, vol. 06; p. 017-1-017-19, ISSN: 1126-6708, doi: 10.1088/1126-6708/2008/06/017
20. A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, E.C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, N. Bianchi, H.P. Blok, H. Botcher, C. Bonomo, A. Borissov, A. Brull, V. Bryzgalov, M. Capiluppi, G.P. Capitani, E. Cisbani, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P.F. Dalpiaz, W. Deconinck, R. De Leo, M. Demey, L. De Nardo, E. De Sanctis, M. Diefenthaler, P. Di Nezza, J. Dreschler, M. Duren, M. Ehrenfried, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, R. Fabbri, A. Fantoni, S. Frullani, D. Gabbert, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, G. Gavrilo, V. Gharibyan, F. Giordano, S. Gliske, L. Grigoryan, C. Hadjidakis, M. Hartig, D. Hasch, T. Hasegawa, G. Hill, A. Hillenbrand, M. Hoek, B. Hommez, I. Hristova, Y. Imazu, A. Ivanilov, H.E. Jackson, R. Kaiser, T. Keri, E. Kinney, A. Kisselev, M. Kopytin, V. Korotkov, P. Kravchenko, L. Lagamba, R. Lamb, L. Lapikas, I. Lehmann, P. Lenisa, P. Liebing, L.A. Linden-Levy, W. Lorenzon, S. Lu, X. Lu, B. Maiheu, N.C.R. Makins, B. Marianski, H. Marukyan, V. Mexner, C.A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, M. Murray, A. Mussgiller, E. Nappi, Y. Naryshkin, A. Nass, M. Negodaev, W.-D. Nowak, L.L. Pappalardo, R. Perez-Benito, N. Pickert, M. Raithel, D. Reggiani, P.E. Reimer, A. Reischl, A.R. Reolon, C. Riedl, K. Rith, S.E. Rock, G. Rosner, A. Rostomyan, L. Rubacek, J. Rubin, D. Ryckbosch, Y. Salomatin, A. Schafer, G. Schnell, B. Seitz, C. Shearer, T.-A. Shibata, V. Shutov, M. Stancari, M. Statera, J.J.M. Steijger, H. Stenzel, J. Stewart, F. Stinzing, J. Streit, S. Taroian, B. Tchuiko, A. Trzcinski, M. Tytgat, A. Vandenbroucke, P.B. van der Nat, G. van der Steenhoven, Y. van Haarlem, C. van Hulse, M. Varanda, D. Veretennikov, V. Vikhrov, I. Vilardi, C. Vogel, S. Wang, S. Yaschenko, Y. Ye, Z. Ye, S. Yen, W. Yu, D. Zeiler, B. Zihlmann, P. Zupranski (2007). Hadronization in semi-inclusive deep-inelastic scattering on nuclei. NUCLEAR PHYSICS. B, vol. 780; p. 1-27, ISSN: 0550-3213
21. AIRAPETIAN A, AKOPOV N, AKOPOV Z, AMARIAN M, AMMOSOV VV, ANDRUS A, ASCHENAUER EC, AUGUSTYNIAN W, AVAKIAN R, AVETISSIAN A, AVETISSIAN E, BAILEY P, BATURIN V, BAUMGARTEN C, BECKMANN M, BELOSTOTSKI S, BERNREUTHER S, BIANCHI N, BLOK HP, BOTTCHEH H, BORISSOV A, BORYSENKO A, BOUWHUIS M, BRACK J, BRULL A, BRYZGALOV V, CAPITANI GP, CHIANG HC, CIULLO G, CONTALBRIGO M., P. FERRETTI DALPIAZ, DE LEO R, DE NARDO L, DE SANTIS E, DEVITSIN E, DI NEZZA P, DUREN M, EHRENFRIED M, ELALAOUI-MOULAY A, ELBAKIAN G, ELLINGHAUS F, ELSCHENBROICH U, ELY J, FABBRI R, FANTONI A, FECHTCHENKO A, FELAWKA L, FOX B, FRANZ J, FRULLANI S, GAPIENKO G, GAPIENKO V, GARIBALDI F, GARROW K, GARUTTI E, GASKELL D, GAVRILOV G, GHARIBYAN V, GRAW G, GREBENIOUK O, GREENIAUS LG, GREGOR IM, HAFIDI K, HARTIG M, HASCH D, HEESBEEN D, HENOCH M, HERTENBERGER R, HESSELINK WHA, HILLENBRAND A, HOEK M, HOLLER Y, HOMMEZ B, IARYGIN G, IVANILOV A, IZOTOV A, JACKSON HE, JGOUN A, KAISER R, KINNEY E, KISSELEV A, KONIGSMANN K, KOPYTIN M, LAZIEV A, LENISA P, LIEBING P, LINDEMANN T, LIPKA K, LORENZON W, LU J, MAIHEU B, MAKINS NCR, MARIANSKI B, MARUKYAN H, MASOLI F, MEXNER V, MEYNNERS N, MIKLOUKHO O, MILLER CA, MIYACHI Y, MUCCIFORA V, NAGAITSEV A, NAPPI E, NARYSHKIN Y, NASS A, NEGODAIEV M, NOWAK WD, OGANESSYAN K, OHSUGA H, PICKERT N, POTASHOV S, POTTERVELD DH, RAITHEL M, REGGIANI D, REIMER PE, REISCHL A, REOLON AR, RIEDL C, RITH K, ROSNER G, ROSTOMYAN A, RUBACEK L, RYCKBOSCH D, SALOMATIN Y, SANJIEV I, SAVIN I, SCARLETT C, SCHAFER A, SCHILL C, SCHNELL G, SCHULER KP, SCHWIND A, SEELE J, SEIDL R, SEITZ B, SHANIDZE R, SHEARER C, SHIBATA TA, SHUTOV V, SIMANI MC, SINRAM K, STANCARI M, STATERA M, STEFFENS E, STEIJGER JJM, STENZEL H, STEWART J, STOSSELEIN U, TAIT P, TANAKA H, TAROIAN S, TCHUIKO B, TERKULOV A, TKABLADZE A, TRZCINSKI A, TYTGAT M, VANDENBROUCKE A, VAN DER NAT P, VAN DER STEENHOVEN G, VETTERLI K, VIKHROV V, VINCTER MG, VOGEL C, VOGT M, VOLMER J, WEISKOPF C, WENDLAND J, WILBERT J, SMIT GY, YEN S, ZIHLMANN B, ZOHRABIAN H, ZUPRANSKI P (2003). Quark fragmentation to π^0 , π^+ , π^- , K^+ , K^- , p and $\bar{p}$ in the nuclear environment. PHYSICS LETTERS. SECTION B, vol. 577; p. 37-46, ISSN: 0370-2693
22. A. Airapetian, Z. Akopov, M. Amarian, A. Andrus, E. C. Aschenauer, W. Augustyniak, H. Avakian, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, A. Bacchetta, P. Bailey, S. Belostotski, N. Bianchi, H. P. Blok, H. Botcher, A. Borissov, A. Borysenko, A. Brull, V. Bryzgalov, M. Capiluppi, G. P. Capitani, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P. F. Dalpiaz, W. Deconinck, R. De Leo, M. Demey, L. De Nardo, E. De Sanctis, E. Devitsin, M. Diefenthaler, P. Di Nezza, J. Dreschler, M. Duren, M. Ehrenfried, A. Elalaoui-Moulay, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, R. Fabbri, A. Fantoni, L. Felawka, S. Frullani, A. Funel, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, K. Garrow, G. Gavrilo, V. Gharibyan, F. Giordano, O. Grebeniouk, I. M. Gregor, H. Guler, C. Hadjidakis, K. Hafidi, M. Hartig, D. Hasch, T. Hasegawa, W. H. A., A. Hillenbrand, M. Hoek, Y. Holler, B. Hommez, I. Hristova, G. Iarygin, A. Ivanilov, A. Izotov, H. E. Jackson, A. Jgoun, R. Kaiser, T. Keri, E. Kinney, A. Kisselev, T. Kobayashi, M. Kopytin, V. Korotkov, V. Kozlov, B. Krauss, V. G. Krivokhijine, L. Lagamba, L. Lapikas, P. Lenisa, P. Liebing, L. A. Linden-Levy, W. Lorenzon, J. Lu, S. Lu, B. Q. Ma, B. Maiheu, N. C. R., Y. Mao, B. Marianski, H. Marukyan, F. Masoli, V. Mexner, N. Meyners, T. Michler, O. Mikloukho, C. A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, M. Murray, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, M. Negodaev, W. D. Nowak, K. Oganessyan, H. Ohsuga, A. Osborne, R. Perez-Benito, N. Pickert, M. Raithel, D. Reggiani, P. E. Reimer, A. Reischl, A. R. Reolon, C. Riedl, K. Rith, G. Rosner, A. Rostomyan, L. Rubacek, J. Rubin, D. Ryckbosch, Y. Salomatin, I. Sanjiev, I. Savin, A. Schafer, G. Schnell, K. P. Schuler, J. Seele, R. Seidl, B. Seitz, C. Shearer, T. A. Shibata, V. Shutov, K. Sinram, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J. J. M., H. Stenzel, J. Stewart, F. Stinzing, J. Streit, P. Tait, H. Tanaka, S. Taroian, B. Tchuiko, A. Terkulov, A. Trzcinski, M. Tytgat, A. Vandenbroucke, P. B. van, G. van der, Y. van Haarlem, V. Vikhrov, C. Vogel, S. Wang, Y. Ye, Z. Ye, S. Yen, B. Zihlmann, P. Zupranski (2007). Beam-spin asymmetries in the azimuthal distribution of pion electroproduction. PHYSICS LETTERS. SECTION B, vol. 648; p. 164-170, ISSN: 0370-2693
23. A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, M. Amarian, A. Andrus, E. C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, P. Bailey, D. Balin, M. Beckmann, S. Belostotski, N. Bianchi, H. P. Blok, H. Botcher, A. Borissov, A. Borysenko, M. Bouwhuis, A. Brull, V. Bryzgalov, M. Capiluppi, G. P. Capitani, T. Chen, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., P. F. Dalpiaz, W. Deconinck, R. De Leo, M. Demey, L. De Nardo, E. De Sanctis, E. Devitsin, P. Di Nezza, J. Dreschler, M. Duren, M. Ehrenfried, A. Elalaoui-Moulay, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, R. Fabbri, A. Fantoni, L. Felawka, S. Frullani, A. Funel, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, K. Garrow, D. Gaskell, G. Gavrilo, V. Gharibyan, O. Grebeniouk, I. M. Gregor, C. Hadjidakis, K. Hafidi, M. Hartig, D. Hasch, W. H. A., A. Hillenbrand, M. Hoek, Y. Holler, B. Hommez, I. Hristova, G. Iarygin, A. Ivanilov, A. Izotov, H. E. Jackson, A. Jgoun, R. Kaiser, E. Kinney, A. Kisselev, T. Kobayashi, M. Kopytin, V. Korotkov, V. Kozlov, B. Krauss, V. G. Krivokhijine, L. Lagamba, L. Lapikas, A. Laziev, P. Lenisa, P. Liebing, L. A. Linden-Levy, W. Lorenzon, H. Lu, J. Lu, S. Lu, B. Q. Ma, B. Maiheu, N. C. R., Y. Mao, B. Marianski, H. Marukyan, F. Masoli, V. Mexner, N. Meyners, T. Michler, O. Mikloukho, C. A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, M. Murray, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, M. Negodaev, W. D. Nowak, K. Oganessyan, H. Ohsuga, A. Osborne, N. Pickert, D. H. Potterveld, M. Raithel, D. Reggiani, P. E. Reimer, A. Reischl, A. R. Reolon, C. Riedl, K. Rith, G. Rosner, A. Rostomyan, L. Rubacek, J. Rubin, D. Ryckbosch, Y. Salomatin, I. Sanjiev, I. Savin, A. Schafer, G. Schnell, K. P. Schuler, J. Seele, R. Seidl, B. Seitz, R. Shanidze, C. Shearer, T. A. Shibata, V. Shutov, K. Sinram, W. Sommer, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J. J. M., H. Stenzel, J. Stewart, F. Stinzing, P. Tait, H. Tanaka, S. Taroian, B. Tchuiko, A. Terkulov, A. Trzcinski, M. Tytgat, A. Vandenbroucke, P. B. van, G. van der, Y. van Haarlem, V. Vikhrov, M. G. Vincet, C. Vogel, J. Volmer, S. Wang, J. Wendland, Y. Ye, Z. Ye, S. Yen, B. Zihlmann, P. Zupranski (2007). Beam-charge azimuthal asymmetry and deeply virtual Compton scattering. PHYSICAL REVIEW D, vol. 75; p. 11103-1-11103-5, ISSN: 0556-2821
24. AIRAPETIAN A, AKOPOV N, AKOPOV Z, AMARIAN M, ANDRUS A, ASCHENAUER EC, AUGUSTYNIAN W, AVAKIAN R, AVETISSIAN A, AVETISSIAN E, BACCHETTA A, BAILEY P, BALIN D, BECKMANN M, BELOSTOTSKI S, BIANCHI N, BLOK HP, BOTTCHEH H, BORISSOV A, BORYSENKO A, BOUWHUIS M, BRULL A, BRYZGALOV V, CAPILUPPI M, CAPITANI GP, CHEN T, G. CIULLO, CONTALBRIGO M., DALPIAZ FERRETTI P, DECONINCK W, DE LEO R, DEMEY M, DE NARDO L, DE SANTIS E, DEVITSIN E, DIEFENTHALER M, DI NEZZA P, DRESCHLER J, DUREN M, EHRENFRIED M, ELALAOUI-MOULAY A, ELBAKIAN G, ELLINGHAUS E, ELSCHENBROICH U, FABBRI R, FANTONI A, FELAWKA L, FRULLANI S, FUNEL A, GAPIENKO G, GAPIENKO V, GARIBALDI F, GARROW K, GAVRILOV G, GHARIBYAN V, GREBENIOUK O, GREGOR IM, HADJIDAKIS C, HAFIDI K, HARTIG M, HASCH D, HESSELINK WHA, HILLENBRAND A, HOEK M, HOLLER Y, HOMMEZ B, HRISTOVA I, LARYGIN G, IVANILOV A, LZOTOV A, JACKSON HE, JGOUN A, KAISER R, KERI T, KINNEY E, KISSELEV A, KOBAYASHI T, KOPYTIN M, KOROTKOV V, KOZLOV V, KRAUSS B, KRIVOKHIJINE V, LAGAMBA L, LAPIKADS L, LAZIEV A, LENISA P, LIEBING P, LINDEN-LEVY LA, LORENZON W, LU H, LU J, LU S, MA BQ, MAIHEU B, MAKINS NCR, MAO Y, MARIANSKI B, MARUKYAN H, MASOLI F, MEXNER V, MEYNNERS N, MICHLER T, MIKLOUKHO O, MILLER CA, MIYACHI Y, MUCCIFORA V, MURRAY M, NAGAITSEV A, NAPPI E, NARYSHKIN Y, NEGODAIEV M, NOWAK WD, OGANESSYAN K, OHSUGA H, OSBORNE A, PICKERT N, POTTERVELD DH, RAITHEL M, REGGIANI D, REIMER PE, REISCHL A, REOLON AR, RIEDL C, RITH K, ROSNER G, ROSTOMYAN A, RUBACEK L, RUBIN J, RYCKBOSCH D, SALOMATIN Y, SANJIEV I, SAVIN I, SCHAFER A, SCHNELL G, SCHULER KP, SEELE J, SEIDL R, SEITZ B, SHEARER C, SHIBATA TA, SHUTOV V, SINRAM K, SOMMER W, STANCARI M, STATERA M, STEFFENS E, STEIJGER JJM, STENZEL H, STEWART J, STINZINGI F, TAITI P, TANAKA H, TAROIAN S, TCHUIKO B, TERKULOV A, TRZCINSKI A, TYTGAT M, VANDENBROUCKE A, VAN DER NAT PB, VAN DER STEENHOVEN G, VAN HAARLEM Y, VIKHROV V, VINCTER MG, VOGEL C, VOLMER J, WANG S, WENDLAND J, YE Y, YE Z, YEN S, ZIHLMANN B, ZUPRANSKI P (2005). Subleading-twist effects in single-spin asymmetries in semi-inclusive deep-inelastic scattering on a longitudinally polarized hydrogen target. PHYSICS LETTERS. SECTION B, vol. 622; p. 14-22, ISSN: 0370-2693

25. A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, M. Amarian, V. V. Ammosov, A. Andrus, E. C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, P. Bailey, V. Baturin, C. Baumgarten, M. Beckmann, S. Belostotski, S. Bernreuther, N. Bianchi, H. P. Blok, H. Bottcher, A. Borissov, M. Bouwhuis, J. Brack, A. Brull, I. Brunn, G. P. Capitani, H. C. Chiang, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., G. R. Court, P. F. Dalpiaz, R. De Leo, L. De Nardo, E. De Sanctis, E. Devitsin, P. Di Nezza, M. Duren, M. Ehrenfried, A. Elalaoui-Moulay, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, J. Ely, R. Fabbri, A. Fantoni, A. Fechtchenko, L. Felawka, B. Fox, J. Franz, S. Frullani, Y. Garber, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, E. Garutti, D. Gaskell, G. Gavrilo, V. Gharibyan, G. Graw, O. Grebeniouk, L. G. Greeniaus, W. Haerberli, K. Hafidi, M. Hartig, D. Hasch, D. Heesbeen, M. Henoch, R. Hertenberger, W. H. A., A. Hillenbrand, Y. Holler, B. Hommez, G. Iarygin, A. Izotov, H. E. Jackson, A. Jgoun, R. Kaiser, E. Kinney, A. Kisselev, K. Konigsmann, H. Kolster, M. Kopytin, V. Korotkov, V. Kozlov, B. Krauss, V. G. Krivokhijine, L. Lagamba, L. Lapikas, A. Laziev, P. Lenisa, P. Liebing, T. Lindemann, K. Lipka, W. Lorenzon, N. C. R., H. Marukyan, F. Masoli, F. Menden, V. Mexner, N. Meyners, O. Mikloukho, C. A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, A. Nass, W. D. Nowak, K. Oganessyan, H. Ohsuga, G. Orlandi, S. Potashov, D. H. Potterveld, M. Raithel, D. Reggiani, P. E. Reimer, A. Reischl, A. R. Reolon, K. Rith, G. Rosner, A. Rostomyan, D. Ryckbosch, I. Sanjiev, I. Savin, C. Scarlett, A. Schafer, C. Schill, G. Schnell, K. P. Schuler, A. Schwind, J. Seibert, B. Seitz, R. Shanidze, T. A. Shibata, V. Shutov, M. C. Simani, K. Sinram, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J. J. M., J. Stewart, U. Stosslein, H. Tanaka, S. Taroian, B. Tchuiko, A. Terkulov, S. Tessarin, E. Thomas, A. Tkabladze, A. Trzcinski, M. Tytgat, G. M. Urciuoli, P. B. van, G. van der, R. van de, D. Veretennikov, M. C. Vetterli, V. Vikhrov, M. G. Vinciter, J. Visser, M. Vogt, J. Volmer, C. Weiskopf, J. Wendland, J. Wilbert, T. Wise, S. Yen, S. Yoneyama, B. Zihlmann, H. Zohrabian, P.... (2007). Transverse polarization of Lambda and (Lambda)over-bar hyperons in quasireal photoproduction. PHYSICAL REVIEW D, vol. 76; p. 92008-1-92008-9, ISSN: 0556-2821
26. AIRAPETIAN A, AKOPOV N, AKOPOV Z, AMARIAN M, ANDRUS A, ASCHENAUER EC, AUGUSTYNIK W, AVAKIAN R, AVETISSIAN A, AVETISSIAN E, BAILEY P, BALIN D, BECKMANN M, BELOSTOTSKI S, BIANCHI N, BLOK HP, BOTTCHE H, BORISSOV A, BORYSENKO A, BOUWHUIS M, BRULL A, BRYZGALOV V, CAPILUPPI M, CAPITANI GP, CHEN T, CHEN X, CHIANG HC, CIULLO G, CONTALBRIGO M., P. FERRETTI DALPIAZ, DECONINCK W, DE LEO R, DEMEY M, DE NARDO L, DE SANCTIS E, DEVITSIN E, DIFENTHALER M, DI NEZZA P, DRESCHLER J, DUREN M, EHRENFRIED M, ELALAOUI-MOULAY A, ELBAKIAN G, ELLINGHAUS F, ELSCHENBROICH U, FABBRI R, FANTONI A, FELAWKA L, FRULLANI S, FUNEL A, GAPIENKO G, GAPIENKO V, GARIBALDI F, GARROW K, GAVRILOV G, GHARIBYAN V, GREBENIOUK O, GREGOR IM, HADJIDAKIS C, HAFIDI K, HARTIG M, HASCH D, HESSELINK WHA, HILLENBRAND A, HOEK M, HOLLER Y, HOMMEZ B, HRISTOVA I, IARYGIN G, IVANILOV A, IZOTOV A, JACKSON HE, JGOUN A, KAISER R, KERI T, KINNEY E, KISSELEV A, KOBAYASHI T, KOPYTIN M, KOROTKOV V, KOZLOV V, KRAUSS B, KRAVCHENKO P, KRIVOKHIJINE VG, LAGAMBA L, LAPIKAS L, LAZIEV A, LENISA P, LIEBING P, LINDEN-LEVY LA, LORENZON W, LU H, LU J, LU S, LU X, MA BQ, MAIHEU B, MAKINS NCR, MANAENKOV SI, MAO Y, MARIANSKI B, MARUKYAN H, MASOLI F, MEXNER V, MEYNER N, MICHLER T, MIKLOUKHO O, MILLER CA, MIYACHI Y, MUCCIFORA V, MURRAY M, NAGAITSEV A, NAPPI E, NARYSHKIN Y, NEGODAIEV M, NOWAK WD, OGANESSYAN K, OHSUGA H, OSBONE A, PICKERT N, POTTERVELD DH, RAITHEL M, REGGIANI D, REIMER PE, REISCHL A, REOLON AR, RIEDL C, RITH K, ROSNER G, ROSTOMYAN A, RUBACEK L, RUBIN J, RYCKBOSCH D, SALOMATIN Y, SANJIEV I, SAVIN I, SCHAFFER A, SCHNELL G, SCHULER KP, SEELE J, SEIDL R, SEITZ B, SHEARER C, SHIBATA TA, SHUTOV V, SINRAM K, SOMMER W, STANCARI M, STATERA M, STEFFENS E, STEIJGER JM, STENZEL H, STEWART J, STINZING F, TAIT P, TANAKA H, TAROIAN S, TCHUIKO B, TERKULOV A, TRZCINSKI A, TYTGAT M, VANDENBROUCKE A, VAN DER NAT PB, VAN DER STEENHOVEN G, VAN HAARLEM Y, VIKHROV V, VINCTER MG, VOGEL C, VOLMER J, WANG S, WENDLAND J, YE Y, YE Z, YEN S, ZIHLMANN B, ZUPRANSKI P (2006). Longitudinal spin transfer to the Lambda hyperon in semiinclusive deep-inelastic scattering. PHYSICAL REVIEW D, vol. 74; p. 72004-1-72004-11, ISSN: 0556-2821
27. A. Airapetian, N. Akopov, Z. Akopov, M. Amarian, V.V. Ammosov, A. Andrus, E.C. Aschenauer, W. Augustyniak, R. Avakian, A. Avetissian, E. Avetissian, P. Bailey, V. Baturin, C. Baumgarten, M. Beckmann, S. Belostotski, S. Bernreuther, N. Bianchi, H.P. Blok, H. Bottcher, A. Borissov, M. Bouwhuis, J. Brack, A. Brull, V. Bryzgalov, G.P. Capitani, H.C. Chiang, G. Ciullo, CONTALBRIGO M., G.R. Court, P.F. Dalpiaz, R. De Leo, L. De Nardo, E. De Sanctis, E. Devitsin, P. Di Nezza, M. Duren, M. Ehrenfried, A. Elalaoui-Moulay, G. Elbakian, F. Ellinghaus, U. Elschenbroich, J. Ely, R. Fabbri, A. Fantoni, A. Fechtchenko, L. Felawka, B. Fox, J. Franz, S. Frullani, Y. Garber, G. Gapienko, V. Gapienko, F. Garibaldi, E. Garutti, D. Gaskell, G. Gavrilo, V. Gharibyan, G. Graw, O. Grebeniouk, L.G. Greeniaus, W. Haerberli, K. Hafidi, M. Hartig, D. Hasch, D. Heesbeen, M. Henoch, R. Hertenberger, W.H.A. Hesselink, A. Hillenbrand, Y. Holler, B. Hommez, G. Iarygin, A. Izotov, H.E. Jackson, A. Jgoun, R. Kaiser, E. Kinney, A. Kisselev, K. Konigsmann, H. Kolster, M. Kopytin, V. Korotkov, V. Kozlov, B. Krauss, V.G. Krivokhijine, L. Lagamba, L. Lapikas, A. Laziev, P. Lenisa, P. Liebing, T. Lindemann, K. Lipka, W. Lorenzon, B.Q. Ma, N.C.R. Makins, H. Marukyan, F. Masoli, F. Menden, V. Mexner, N. Meyners, O. Mikloukho, C.A. Miller, Y. Miyachi, V. Muccifora, A. Nagaitsev, E. Nappi, Y. Naryshkin, A. Nass, W.D. Nowak, K. Oganessyan, H. Ohsuga, G. Orlandi, S. Potashov, D.H. Potterveld, M. Raithel, D. Reggiani, P.E. Reimer, A. Reischl, A.R. Reolon, K. Rith, G. Rosner, A. Rostomyan, D. Ryckbosch, I. Sanjiev, Igor A. Savin, C. Scarlett, A. Schafer, C. Schill, G. Schnell, K.P. Schuler, A. Schwind, R. Seidl, J. Seibert, B. Seitz, R. Shanidze, T.A. Shibata, V. Shutov, M.C. Simani, K. Sinram, M. Stancari, M. Statera, E. Steffens, J.J.M. Steijger, J. Stewart, U. Stosslein, H. Tanaka, S. Taroian, B. Tchuiko, S. Tessarin, E. Thomas, A. Tkabladze, A. Trzcinski, M. Tytgat, G.M. Urciuoli, P. van der Nat, G. van der Steenhoven, R. van de Vyver, M.C. Vetterli, V. Vikhrov, M.G. Vinciter, J. Visser, C. Vogel, M. Vogt, J. Volmer, C. Weiskopf, J. Wendland, J. Wilber... (2003). Measurement of single-spin azimuthal asymmetries in semi- inclusive electroproduction of pions and kaons on a longitudinally polarised deuterium target. PHYSICS LETTERS. SECTION B, vol. 562; p. 182-192, ISSN: 0370-2693
28. LAI A, MARRAS D, BEVAN A, DOSANJH RS, GERSHON TJ, HAY B, KALMUS GE, LAZZERONI C, MUNDAY DJ, NEEDHAM MD, OLAIYA E, PARKER MA, WHITE TO, WOTTON SA, BARR G, BOCQUET G, CECCUCCI A, CUHADAR-DONZELMANN T, CUNDY D, D'AGOSTINI G, DOBLE N, FALALEEV V, GATIGNON L, GONIDEC A, GORINI B, GOVI G, GRAFSTROM P, KUBISCHTA W, LACOURT A, LENTI M, LUITZ S, MIKULEC I, NORTON A, PALESTINI S, PANZER-STEINDEL B, TATISHVILI G, TAUREG H, VELASCO M, WAHL H, CHESHKOV C, HRISTOV P, KEKELIDZE V, MADIGOJINE D, MOLOKANOVA N, POTREBENIKOV Y, ZINCHENKO A, KNOWLES I, MARTIN V, SACCO R, WALKER A, CONTALBRIGO M., DALPIAZ P., DUCLOS J, FRABETTI PL, GIANOLI A, MARTINI M, PETRUCCI F, SAVRIE M, BIZZETI A, CALVETTI M, COLLAZUOL G, GRAZIANI G, IACOPINI E, VELTRI M, BECKER HG, EPPARD M, FOX H, HOLTZ K, KALTER A, KLEINKNECHT K, KOCH U, KOPKE L, DA SILVA PL, MARUELLI P, PELLMANN I, PETERS A, RENK B, SCHMIDT SA, SCHONHARTING V, SCHUE Y, WANKE R, WINHART A, WITTGEN M, CHOLLET JC, FAYARD L, ICONOMIDOU-FAYARD L, OCARIZ J, UNAL G, WINGERTER-SEEZ I, ANZIVINO G, CENCI P, IMBERGAMO E, LUBRANO P, MESTVIRISHVILI A, NAPPI A, PEPE M, PICCINI M, CAROSI R, CASALI R, CERRI C, CIRILLI M, COSTANTINI F, FANTECHI R, GIUDICI S, MANNELLI I, PIERAZZINI G, SOZZI M, CHEZE JB, COGAN J, DE BEER M, DEBU P, FORMICA A, DE CASSAGNAC RG, MAZZUCATO E, PEYAUD B, TURLAY R, VALLAGE B, HOLDER M, MAIER A, ZIOLKOWSKI M, ARCDIACONO R, BIINO C, CARTIGLIA N, CLEMENCIC M, MARCHETTO F, MENICCHETTI E, PASTRONE N, NASSALSKI J, RONDIO E, SZLEPER M, WISLICKI W, WRONKA S, DIBON H, FISCHER G, JEITLER M, MARKYTAN M, NEUHOEFER G, PERNICKA M, TAUROK A, WIDHALM L (2002). Precise measurement of the decay $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$. PHYSICS LETTERS. SECTION B, vol. 536; p. 229-240, ISSN: 0370-2693
29. LAI A, MARRAS D, BEVAN A, DOSANJH RS, GERSHON TJ, HAY B, KALMUS GE, LAZZERONI C, MUNDAY DJ, NEEDHAM MD, OLAIYA E, PARKER MA, WHITE TO, WOTTON SA, BARR G, BOCQUET G, CECCUCCI A, CUHADAR-DONZELMANN T, CUNDY D, D'AGOSTINI G, DOBLE N, FALALEEV V, FUNK W, GATIGNON L, GONIDEC A, GORINI B, GOVI G, GRAFSTROM P, KUBISCHTA W, LACOURT A, LENTI M, LUITZ S, MATHEYS JP, MIKULEC I, NORTON A, PALESTINI S, PANZER-STEINDEL B, SCHINZEL D, TATISHVILI G, TAUREG H, VELASCO M, VOSSNACK O, WAHL H, CHESHKOV C, GAPONENKO A, HRISTOV P, KEKELIDZE V, MADIGOJINE D, MOLOKANOVA N, POTREBENIKOV Y, TKACHEV A, ZINCHENKO A, KNOWLES I, MARTIN V, PARSONS H, SACCO R, WALKER A, CONTALBRIGO M., DALPIAZ P., DUCLOS J, FRABETTI PL, GIANOLI A, MARTINI M, PETRUCCI F, SAVRIE M, SCARPA M, BIZZETI A, CALVETTI M, COLLAZUOL G, GRAZIANI G, IACOPINI E, MARTELLI F, VELTRI M, BECKER HG, BLUMER H, COWARD D, EPPARD M, FOX H, HIRSTIUS A, HOLTZ K, KALTER A, KLEINKNECHT K, KOCH U, KOPKE L, DA SILVA PL, MARUELLI P, PELLMANN I, PETERS A, SCHMIDT SA, SCHONHARTING V, SCHUE Y, WANKE R, WINHART A, WITTGEN M, CHOLLET JC, CREPE SJ, FAYARD L, ICONOMIDOU-FAYARD L, OCARIZ J, UNAL G, WINGERTER-SEEZ I, ANZIVINO G, CENCI P, IMBERGAMO E, LUBRANO P, MESTVIRISHVILI A, NAPPI A, PEPE M, PICCINI M, BERTANZA L, CALAFIURA P, CAROSI R, CASALI R, CERRI C, CIRILLI M, COSTANTINI F, FANTECHI R, GIUDICI S, MANNELLI I, MARZULLI V, PIERAZZINI G, SOZZI M, CHEZE JB, COGAN J, DE BEER M, DEBU P, DERUE F, FORMICA A, DE CASSAGNAC RG, MAZZUCATO E, PEYAUD B, TURLAY R, VALLAGE B, AUGUSTIN I, BENDER M, HOLDER M, MAIER A, ZIOLKOWSKI M, ARCDIACONO R, BIINO C, CARTIGLIA N, GUIDA R, MARCHETTO F, MENICCHETTI E, PASTRONE N, NASSALSKI J, RONDIO E, SZLEPOR M, WISLICKI W, WRONKA H, FISCHER G, JEITLER M, MARKYTAN M, NEUHOEFER G, PERNICKA M, TAUROK A, WIDHALM L, CA NA48 COLLABORAT (2001). A precise measurement of the direct CP violation parameter $Re(\epsilon/\epsilon')$. THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL. C, PARTICLES AND FIELDS, vol. 22; p. 231-254, ISSN: 1434-6044
30. LAI A, MARRAS D, BEVAN A, DOSANJH RS, GERSHON TJ, HAY B, KALMUS GE, LAZZERONI C, MUNDAY DJ, OLAIYA E, PARKER MA, WHITE TO, WOTTON SA, BARR G, BOCQUET G, CECCUCCI A, CUHADAR-DONZELMANN T, CUNDY D, D'AGOSTINI G, DOBLE N, FALALEEV V, GATIGNON L, GONIDEC A, GORINI B, GOVI G, GRAFSTROM P, KUBISCHTA W, LACOURT A, NORTON A, PALESTINI S, PANZER-STEINDEL B, TAUREG H, VELASCO M, WAHL H, CHESHKOV C, GAPONENKO A, HRISTOV P, KEKELIDZE V, LITOV L, MADIGOJINE D, MOLOKANOVA N, POTREBENIKOV Y, STOYNEV S, TATISHVILI G, TKACHEV A, ZINCHENKO A, KNOWLES I, MARTIN V, SACCO R, WALKER A, CONTALBRIGO M., DALPIAZ P., DUCLOS J, FRABETTI PL, GIANOLI A, MARTINI M, PETRUCCI F, SAVRIE M, BIZZETI A, CALVETTI M, COLLAZUOL G, GRAZIANI G, IACOPINI E, LENTI M, MARTELLI F, VELTRI M, BECKER HG, EPPARD K, EPPARD M, FOX H, KALTER A, KLEINKNECHT K, KOCH U, KOPKE L, DA SILVA PL,

MAROUELLI P, PELLMANN I, PETERS A, RENK B, SCHMIDT SA, SCHONHARTING V, SCHUE Y, WANKE R, WINHART A, WITTGEN M, CHOLLET JC, FAYARD L, ICONOMIDOU-FAYARD L, OCARIZ J, UNAL G, WINGERTER-SEEZ I, ANZIVINO G, CENCI P, IMBERGAMO E, LUBRANO P, MESTVIRISHVILI A, NAPPI A, PEPE M, PICCINI M, CASALI R, CERRI C, CIRILLI M, COSTANTINI F, FANTECHI R, FIORINI L, GIUDICI S, LAMANNA G, MANNELLI I, PIERAZZINI G, SOZZI M, CHEZE JB, COGAN J, DE BEER M, DEBU P, FORMICA A, DE CASSAGNAC RG, MAZZUCATO E, PEYAUD B, TURLAY R, VALLAGE B, HOLDER M, MAIER A, ZIOLKOWSKI M, ARCDIACONO R, BIINO C, CARTIGLIA N, GUIDA R, MARCHETTO F, MENICCHETTI E, PASTRONE N, NASSALSKI J, RONDIO E, SZLEPER M, WISLICKI W, WRONKA S, DIBON H, FISCHER G, JEITLER M, MARKYTAN M, MIKULEC I, NEUHOFFER G, PERNICKA M, TAUROK A, WIDHALM L, CA NA48 COLLABORATION (2004). Measurement of the branching ratio of the decay $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^- \nu$ and extraction of the CKM parameter V_{us} . PHYSICS LETTERS. SECTION B, vol. 602; p. 41-51, ISSN: 0370-2693

9 - Elenco delle Unità di Ricerca (UR)

Unità	Responsabile dell'Unità di Ricerca	Qualifica	Istituzione di appartenenza	Dipartimento/Istituto/Divisione/Settore	Mesi/uomo
1	CONTALBRIGO Marco	Ricercatore	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare		98
2	PAPPALARDO Luciano Libero	Dottore di Ricerca	Università degli Studi di FERRARA		80

10 - Breve descrizione delle Unità di Ricerca

La creazione di una facility sperimentale per la misura di sezioni d'urto di fusione polarizzata fra nuclei leggeri e' un progetto complesso che deve necessariamente vedere coinvolti piu' gruppi di ricerca. Il presente progetto prevede la collaborazione fra quattro Istituti europei, di cui due italiani, con precise divisioni dei ruoli e responsabilità.

Il personale italiano delle Unità di Ricerca e' attivo da molti anni nella fisica dello spin nucleare mediante la partecipazione a diverse collaborazioni internazionali. Dal 1997 partecipa alla collaborazione internazionale HERMES: l'esperimento, installato sull'anello di elettroni HERA del laboratorio DESY di Amburgo, studia la struttura di spin del nucleone in reazioni di Deeply Inelastic Scattering (DIS) di elettroni polarizzati su nucleoni polarizzati. Il personale afferente alle due Unità di Ricerca ha contribuito in maniera significativa ai risultati dell'esperimento: fra i suoi membri Paolo Lenisa e' stato responsabile del bersaglio polarizzato dal 2000 e Marco Contalbrigo e' stato responsabile delle analisi inclusive con bersagli polarizzati longitudinalmente ed e' attualmente il responsabile delle analisi con bersagli trasversalmente polarizzati.

Il personale italiano delle Unità di ricerca e' firmatario di proposte di misure collegate agli effetti di spin e momento trasversi in reazioni DIS al Jefferson Lab, in un regime complementare ad HERMES (e all'altro esperimento in presa dati COMPASS) ed a luminosità di diversi ordini di grandezza maggiori. Marco Contalbrigo e' portavoce di un esperimento approvato per la misura degli effetti di spin-orbita nel nucleone con fascio a 12 GeV.

Il personale italiano delle due Unità di Ricerca ha presentato, insieme a collaboratori internazionali, la proposta PAX, "Polarized Antiproton Experiments", di cui un membro dell'Unità e' co-spokesperson. La proposta si inserisce nel progetto "Facility of Antiproton and Ion Research" (FAIR) di un grande laboratorio europeo per lo studio della fisica adronica al GSI di Darmstadt. La proposta si basa sulla possibilità di ottenere, per la prima volta, un fascio di antiprotoni polarizzati di alta qualità, per lo studio di effetti di spin trasverso del nucleone attraverso processi di Drell-Yan (DY) e diffusione elastica pbar-p. L'utilizzo di un bersaglio polarizzato simile a quello di HERMES interno alla linea del fascio e la creazione di un collider pbar-p polarizzato permettono di misurare per la prima volta reazioni di Drell-Yan doppio polarizzate, rendendo accessibili importanti osservabili mai misurate finora e legati alla struttura del nucleone. L'Unità di ricerca e al momento impegnata in esperimenti di polarizzazione degli antiprotoni tramite metodo di spin-filtering. Questo processo prevede la selezione progressiva di uno stato di spin del fascio dall'interazione con un bersaglio gassoso polarizzato interno alla linea di fascio, grazie alle diverse dipendenze dello scattering dallo spin.

L'Unità di Ricerca coordinata da Contalbrigo Marco e' composta da personale dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Ferrara, e da personale straniero afferente agli Istituti Europei partecipanti al progetto:

*) "Institut für KernPhysik - Forschungszentrum Juelich" (IKP FZ Juelich), Germania

*) "Petersburg Nuclear Physics Institute - Russian Academy of Sciences" (PNPI RAS), Gatchina, Russia

L'INFN Ferrara, in collaborazione con l'IKP di Juelich, sta sviluppando un rivelatore al silicio per esperimenti di polarizzazione di fasci di (anti)protoni tramite spin-filtering. Il rivelatore e' disegnato per misurare protoni e deuteroni di rinculo, lavorare in vuoto per poter misurare con precisione particelle di bassa energia, utilizzare strati di silicio di diversa spessore per ottimizzare il tracciamento di particelle di energia diversa e l'identificazione dei vari isotopi, essere in grado di generare da solo il trigger di acquisizione. Il rivelatore si basa su wafer di silicio a strip, a doppia faccia per la ricostruzione spaziale degli hit, e di grandi dimensioni (5x5 o 10x10 cm²) per aumentare l'accettazione angolare e quindi la luminosità e la copertura in angolo solido. Le caratteristiche di questo rivelatore lo rendono perfettamente adatto alla rivelazione dei prodotti della reazione di fusione fra nuclei leggeri. Gran parte dello sviluppo del rivelatore puo' quindi essere riutilizzato per il presente progetto.

Il supporto tecnico necessario e' assicurato dalla partecipazione dal responsabile del Servizio Meccanico e del Servizio Elettronico della Sezione. Si sottolinea che il Servizio Meccanico ha fornito le celle di accumulazione del bersaglio di HERMES e ha avuto la responsabilità dell'installazione sulla linea di fascio dell'anello HERA del DESY. Il Servizio Elettronico sta sviluppando parte dell'elettronica di readout del rivelatore di PAX (in particolare la scheda di trigger e di prescaler e il software di gestione dei chip di front-end e degli ADC completo di protocollo per la soppressione degli zeri). L'Unità sta allestendo a Ferrara un laboratorio di caratterizzazione e calibrazione dei rivelatori al silicio.

L'Unità contribuirà all'allestimento del rivelatore di silicio e relativa elettronica di lettura come ulteriore applicazione dello sviluppo in atto con l'IKP di Juelich del tracciamento di (anti)protoni e deuteroni per esperimenti di polarizzazione di fasci.

L'Unità assicura inoltre il collegamento e la collaborazione con i gruppi di ricerca stranieri partecipanti al progetto.

Il Petersburg Nuclear Physics Institute della Russian Academy of Sciences, Gatchina, Russia (PNPI RAS), ha la responsabilità della sorgente ionica per il fascio incidente insieme al sistema di accelerazione degli ioni fino ad energie di 100 keV e offre i propri locali per l'installazione della facility. I partecipanti al progetto hanno riconosciute competenze essendosi occupati del disegno del sistema di raffreddamento del rivelatore al silicio per la rivelazione dei decadimenti Lambda ad HERMES, del raffreddamento del dissociatore della ABS operante al COSY, della realizzazione di una pompa criogenica da 10k litri/h per la camera di scattering dell'esperimento PAX. Essi partecipano inoltre ad un programma di ricerca per la polarizzazione molecolare di idrogeno e deuterio dalla ricombinazione di atomi polarizzati.

L'Institut für KernPhysik del laboratorio Forschungszentrum Jülich, Germania (IKP FZJ), mette a disposizione un polarimetro a lambshift per la misura della polarizzazione del fascio bersaglio. Il personale dell'IKP ha già disegnato e realizzato polarimetri di questo tipo ed e' responsabile del sistema criogenico del solenoide superconduttore dell'esperimento WASA al COSY.

L'Unità di Ricerca coordinata da Luciano Pappalardo e' composta da personale dell'Università di Ferrara. L'Unità ha acquisito grande esperienza nei bersagli gassosi polarizzati, gestendo dal 2000 il bersaglio polarizzato dell'esperimento internazionale HERMES sotto la responsabilità dei componenti dell'Unità. La gestione ha interessato il sistema di iniezione del gas polarizzato e non, la diagnostica del bersaglio e il controllo del sistema di raffreddamento criogenico, che dal 2006 si e' esteso al solenoide superconduttore del rivelatore di rinculo. L'Unità gestisce il laboratorio SpinLab del Dipartimento di Fisica per lo sviluppo di sorgenti di fasci atomici polarizzati (ABS) di alta intensità. Nel laboratorio sono attivi un ABS completo dei sistemi di polarizzazione, e un ABS di test per l'ottimizzazione

dello stadio di dissociazione del gas atomico. Inoltre e' in fase di allestimento un banco di prova per magneti superconduttori alla temperatura di lavoro, con applicazioni sul controllo dei fasci atomici delle ABS e dei fasci di ioni accelerati. Le competenze dell'Unita' saranno utili per la progettazione e la costruzione del sistema magnetico per il mantenimento della polarizzazione dei due fasci. L'Unita' ha la responsabilita' di approntare una sorgente atomica per il fascio bersaglio, aggiornando ed adattando allo scopo quella attualmente in uso nel laboratorio SpinLab.

11 - Obiettivi scientifici del progetto di ricerca e risultati attesi

Le reazioni di fusione rilevanti per la produzione di energia sono limitate ai nuclei leggeri, praticamente agli isotopi dell'idrogeno e dell'elio. Il rate della reazione e' determinato alle basse energie dalla barriera Coloumbiana e solo le reazioni altamente esotermiche (alto valore Q positivo) possono essere utilizzate. Quindi per lo piu' sono considerate reazioni a quattro o cinque nucleoni (fusione deuterio-trizio, deuterio-elio e deuterio-deuterio) ad energie comprese fra i 10 e i 100 keV.

Le reazioni piu' interessanti per l'energia da fusione sono le seguenti

fusione D-T: $[3H(d,n)4He] \quad d + 3H \rightarrow n + 4He + 17.6 \text{ MeV}$

fusione D-He: $[3He(d,p)4He] \quad d + 3He \rightarrow p + 4He + 18.3 \text{ MeV}$

Tra le due, la reazione $3H(d,n)4He$ (fusione D-T) sembra essere la scelta piu' promettente per la maggior sezione d'urto e la maggior densita' di energia a temperature inferiori del plasma. Il deuterio e' un isotopo naturale dell'idrogeno e facilmente reperibile. Il trizio e' pure un isotopo dell'idrogeno, ma e' presente in natura solo in quantita' trascurabili a causa del tempo di dimezzamento radioattivo di 12.32 anni. Di conseguenza, la maggior parte dei reattori prevede l'utilizzo degli isotopi naturali del litio per la produzione di trizio dal litio attraverso le seguenti reazioni: $n + 6Li \rightarrow T + 4He$ e $n + 7Li \rightarrow T + 4He + n$. Il neutrone interagente proviene dalle contemporanee reazioni di fusione del deuterio-trizio che producono l'energia. La fusione del $6Li$ e' leggermente esotermica e contribuisce al guadagno energetico del reattore. La combustione del $7Li$ e' endotermica ma non consuma il neutrone. La disponibilita' del litio e' meno abbondante di quella del deuterio ma ancora sufficiente a permettere di coprire il fabbisogno di energia umano per migliaia di anni.

La fusione D-T ha alcuni svantaggi: essa produce grandi quantita' di neutroni che rendono radioattiva la struttura del reattore; rilascia solo circa il 20 % dell'energia di fusione alle particelle cariche (il resto va ai neutroni), il che limita l'efficienza con cui questa energia puo' essere convertita in forme utili; richiede l'utilizzo del litio che e' altamente infiammabile e del radioisotopo trizio che, come l'idrogeno, e' difficile da contenere e potrebbe fuoriuscire dal reattore.

Di particolare gravita' e' il problema dovuto alla produzione di neutroni. Il neutrone da 14.1 MeV prodotto dalla reazione deve essere opportunamente schermato e pone seri problemi di attivazione o modificazione del materiale. Questo tipo di problemi si traduce in questioni economiche rilevanti. Il flusso di neutroni atteso per un reattore commerciale di fusione D-T e' circa 100 volte maggiore di quello di un reattore di fissione. La realizzazione di materiali adatti allo schermaggio sta procedendo ma il loro utilizzo in un reattore non e' previsto prima della generazione successiva a ITER. Dopo una singola serie di prove al JET, il piu' grande reattore che ha utilizzato questo combustibile finora, la camera di vuoto e' risultata talmente radioattiva da impedire operazioni in loco per un anno dopo la fine dei test.

La reazione di fusione del deuterio-elio, sebbene con rese energetiche inferiori, offre il vantaggio di essere priva di neutroni e potrebbe quindi risultare l'alternativa ideale a quella D-T che presenta gli svantaggi sopra descritti. Per contro, la fusione D-He richiede una temperatura piu' alta per l'accensione della reazione. Inoltre, un reattore basato su questa reazione non sarebbe del tutto privo di neutroni a causa delle reazioni di fusione deuterio-deuterio che avvengono contemporaneamente alle precedenti (anche se con sezione d'urto ed energia neutronica finale inferiori):

fusione D-D: $2H(2H,n)3He + 3.3 \text{ MeV}$ e $2H(2H,p)3H + 4.0 \text{ MeV}$.

L'idea di fusione polarizzata e' stata introdotta negli anni ottanta. Essa offrirebbe numerosi vantaggi rispetto la fusione tradizionale:

- *) controllo del flusso neutronico con la soppressione di reazioni con neutroni nello stato finale a favore di reazioni con particelle cariche come prodotti;
- *) controllo della direzione di emissione dei prodotti della reazione;
- *) aumento del rate della reazione.

Alcuni di questi benefici potrebbero permettere un limite di accensione piu' basso e condizioni di utilizzo del reattore economicamente migliori, grazie al minore danno da radiazione e attivazione delle strutture. In particolare la copertura necessaria a convertire l'energia dei neutroni in calore potrebbe risultare piu' semplice e piu' durevole nel tempo.

Alcuni aspetti della fusione polarizzata devono essere chiariti prima di poterne definire le reali potenzialita' applicative. Per valutare gli effetti della polarizzazione sulla produzione di energia da fusione, infatti, sono necessari dati sperimentali di alta precisione sulle reazioni di fusione di bassa energia. I dati sperimentali esistenti per queste reazioni riguardano per lo piu' interazioni fra nuclei non polarizzati. In realta' la sezione d'urto potrebbe avere importanti dipendenze dalla polarizzazione, con implicazioni per i parametri di disegno dei futuri reattori. Finora non sono state ancora misurate le correlazioni in spin della sezione d'urto: le analisi e predizioni esistenti sulla fusione polarizzata si basano su un database di dati mondiali relativo ad altri (piu' semplici) osservabili. I calcoli teorici di queste sezioni d'urto a multi-corpi sono complicati e non e' nota l'accuratezza delle previsioni. Una risposta definitiva puo' venire solo da misure sperimentali dirette.

Alle basse energie qui in considerazione le reazioni di fusione D-T e D-He procedono attraverso stati risonanti in onda-S (energie del deuterio nel laboratorio di 107 keV per la reazione $3H(d,p)4He$ e di 430 keV per la reazione $3He(d,p)4He$, rispettivamente). Evidenze sperimentali mostrano che questi stati risonanti sono stati $J^\pi = 3/2^+$ quasi puri con contaminazioni molto piccole (dell'ordine del percento) di $J^\pi = 1/2^+$ o di altre onde parziali superiori. Siccome le transizioni avvengono praticamente attraverso un unico elemento di matrice, le predizioni riguardo la sezione d'urto e gli osservabili di polarizzazione sono abbastanza credibili. Essi prevedono che la polarizzazione delle particelle nello stato iniziale offrirebbe l'interessante possibilita' di aumentare la resa della fusione del 50 %, diminuendo il limite di pareggio di un reattore.

A differenza del caso a cinque nucleoni, il meccanismo delle reazioni di fusione D-D a quattro nucleoni e' molto complicato, con 16 elementi di matrice complessi che includono onde S, P e D che contribuiscono anche a bassa energia. Predizioni dettagliate richiedono calcoli di bassa energia affidabili al momento difficili da ottenere.

Un punto interessante e' che i prodotti di reazione sono emessi in modo anisotropo in reazioni di fusione con particelle iniziali polarizzate. Questo potrebbe essere utilizzato per indirizzare i neutroni in direzioni predefinite, dove la loro energia potrebbe essere maggiormente sfruttata o dove i loro effetti dannosi potrebbero essere minimizzati. E' stato suggerito che la produzione di neutroni nella reazione deuterio-deuterio potrebbe essere sostanzialmente ridotta polarizzando i deuteri nello stato iniziale in modo da formare un quintetto ($spin=2$) che richiederebbe transizioni di spin-flip proibite dal principio di Pauli (trascurando il contributo in onda-D del deuterio). Finora le evidenze sperimentali indirette non permettono di trarre conclusioni definitive: una misura diretta non e' ad oggi disponibile e sarebbe assai importante.

L'interesse per questo tipo di reazioni sta aumentando per varie ragioni.

Lo studio delle reazioni nucleari polarizzate e' un importante campo di prova per calcoli teorici a multi-corpi. I progressi sono stati molto piu' lenti del caso a tre nucleoni a causa della struttura molto piu' complicata del sistema a quattro nucleoni e agli enormi problemi connessi con la soluzione del problema coloumbiano, specialmente a bassa energia. Il confronto fra risultati sperimentali e predizioni teoriche, mostra che le discrepanze non risolte nel caso a tre nucleoni si presentano persino maggiori nel caso a quattro nucleoni. Gli effetti della polarizzazione a bassa energia sono maggiori nel sistema a quattro corpi come conseguenza della partecipazione di onde P e D nel canale iniziale.

Dati sulla reazione di fusione del deuterio a bassa energia sono di grande ed attuale interesse anche per l'astrofisica. Le sezioni d'urto di fusione degli elementi leggeri dominano le incertezze teoriche sulla nucleosintesi primordiale successiva al Big-Bang e hanno un ruolo fondamentale nell'evoluzione stellare. Con l'avvento di nuovi dati sulle sezioni d'urto nucleari, osservazioni dell'abbondanza degli elementi e sulla anisotropia del fondo cosmico, sara' possibile definire limiti piu' stringenti per la astrofisica nucleare, e in particolare per i modelli stellari e cosmologici.

Il presente progetto si propone lo studio sperimentale dettagliato di reazioni nucleari di fusione di elementi leggeri di bassa energia. Le informazioni acquisibili

hanno importanti implicazioni in molti campi: le questioni energetiche legate ai reattori a fusione, le teorie nucleari con sistemi a multi-corpi, le previsioni in astrofisica dell'evoluzione stellare e della formazione dell'Universo.

In particolare, il progetto prevede la realizzazione di una facility per la misura di reazioni nucleari di fusione e il completamento di un primo ciclo di misure.

La facility sperimentale si compone dei seguenti apparati principali:

*) fascio atomico polarizzato: sorgenti di fasci atomi polarizzati (ABS) sono in sviluppo nel laboratorio SpinLab di Ferrara e in uso in diversi laboratori internazionali. Si basano sulla dissociazione di un gas molecolare e successiva selezione di stati iperfini con polarizzazione nucleare data tramite separazione di tipo Stern-Gerlach e transizione a radiofrequenza fra stati iperfini.

*) fascio ionico polarizzato: gli atomi di una seconda sorgente di fasci atomici polarizzati sono dapprima ionizzati e poi accelerati tramite un campo elettrostatico fino al punto di interazione. L'accelerazione del fascio definisce l'energia della reazione di fusione. La polarizzazione del fascio ionico si può misurare dall'interazione con bersagli non polarizzati in reazioni con analyzing power (asimmetrie di singolo spin) noti.

*) polarimetro a lamb shift: la polarizzazione del fascio atomico va misurata e controllata nel tempo. Il polarimetro a lamb-shift permette di misurare la polarizzazione nucleare di un fascio atomico di deuterio con precisione dell'1 % in pochi secondi. Esso misura l'intensità di transizioni Lyman-alfa di stati metastabili selezionati in un opportuno filtro di spin.

*) rivelatore al silicio: per la rivelazione di prodotti di fusione con energie di qualche MeV serve posizionare i rivelatori direttamente in vuoto. I rivelatori al silicio permettono di caratterizzare completamente l'evento essendo in grado di misurare la posizione, l'energia e di distinguere i diversi isotopi dalla relazione fra energia cinetica ed energia depositata. Il sistema di read-out prevede che il trigger di acquisizione sia dato dal rivelatore al silicio stesso.

I risultati attesi principali sono elencati nel seguito.

*) Al termine del primo anno: aggiornamento e adattamento della sorgente di fasci atomici attualmente in uso a SpinLab; simulazioni per la progettazione del punto di interazione e della geometria del rivelatore; progettazione dell'acceleratore elettrostatico; preparazione e trasporto a Gatchina della sorgente ionica e del polarimetro a lambshift dell'IKP FZ Juelich.

*) Al termine del secondo anno: caratterizzazione sorgente fascio ionico e costruzione acceleratore; acquisto dei rivelatori al silicio; test e calibrazione dei rivelatori; allestimento del supporto e del sistema di raffreddamento del rivelatore; completamento del sistema di alimentazione e di lettura del rivelatore; trasporto a Gatchina della sorgente di fasci atomici di Ferrara; allestimento del fascio bersaglio completo di polarimetro e inizio caratterizzazione; messa in opera del fascio incidente (sorgente e accelerazione elettrostatica).

*) al termine del terzo anno: trasporto rivelatore a Gatchina, allestimento del punto di interazione completo; messa in opera della facility per la misura delle reazioni nucleari completa di sorgente atomica (fascio bersaglio), sorgente ionica (fascio incidente) con acceleratore elettrostatico, polarimetro e rivelatore dei prodotti di reazione. Caratterizzazione del fascio incidente con misure di analyzing power noto, per esempio $3\text{He}(d\text{-polarizzato}, p)4\text{He}$. La messa in opera dei vari componenti sarà documentata da presentazioni a conferenze internazionali o da pubblicazioni su riviste internazionali specializzate, come "Nuclear Instruments and Methods". La configurazione iniziale prevede fasci polarizzati di deuterio per lo studio della fusione D-D. Successive estensioni prevedono fasci bersagli polarizzati di elio ed eventualmente di trizio per lo studio di tutte le reazioni di fusione sopra descritte.

*) al termine del quarto anno: completamento di un primo ciclo di misure e pubblicazione dei risultati relativi, negli atti di conferenze o in articoli di riviste internazionali. Le misure del primo ciclo saranno presumibilmente relative alla fusione deuterio-deuterio nell'intervallo energetico con più alta sezione d'urto. Queste misure corrispondono alle condizioni sperimentali più favorevoli e sono fra le misure potenzialmente più interessanti, per la più complessa fenomenologia polarizzata.

Il progetto prevede inoltre:

*) la predisposizione di un programma esaustivo di misure da completarsi grazie alla facility realizzata, eventualmente in continuazione e ampliamento del presente progetto. In particolare si prevede lo sviluppo di un fascio bersaglio polarizzato di 3He .

*) lo studio di fattibilità dell'utilizzo di un bersaglio polarizzato: una cella di accumulazione del gas atomico polarizzato, posizionata lungo l'asse del fascio ionico, e in grado di aumentare fino a due ordini di grandezza la densità effettiva del bersaglio rispetto un semplice fascio atomico da ABS. Tuttavia le pareti della cella devono essere sottilissime per permettere la rivelazione dei prodotti di fusione (celle fino a 5 micron di teflon sono già in fase di realizzazione). Le pareti della cella devono inoltre ridurre al minimo la depolarizzazione da interazioni superficiali del gas. La cella deve essere immersa in un campo magnetico di mantenimento della polarizzazione e la superficie del rivelatore deve aumentare per coprire la regione di interazione non più puntiforme.

*) la collaborazione con altri gruppi sulle problematiche di iniezione di carburante polarizzati in reattore di fusione. In particolare l'Unità ha iniziato una collaborazione con il Jefferson Lab per misure di DIS con l'esperimento CLAS al Jefferson Lab, USA. L'esperimento prevede di utilizzare bersagli solidi con stato di polarizzazione congelato dall'azione combinata di basse temperature ed alti campi magnetici. Una possibile applicazione delle tecnologie di questi bersagli sarebbe la produzione di sfere polarizzate per alimentare i reattori a fusione. L'iniezione di carburante sotto forma di sfere solide è uno dei metodi più studiati per la fusione perché permetterebbe di alimentare la reazione direttamente al centro del plasma. In questo senso sarebbe molto più efficiente del tradizionale flusso di gas che investe soprattutto la periferia del plasma.

Il progetto, se finanziato, permetterebbe la realizzazione di un laboratorio per lo studio delle reazioni nucleari di fusione in grado di assicurare un ampio programma di misure fondamentali per la fisica e astrofisica di base e per i programmi sul fabbisogno energetico futuro.

12 - Base di partenza scientifica nazionale o internazionale

Le reazioni più promettenti per la produzione di energia da fusione nucleare sono

fusione D-T: $3\text{H}(d,n)4\text{He}$

fusione D-He: $3\text{He}(d,p)4\text{He}$

fusione D-D: $D(d,p)3\text{H}$ e $D(d,n)3\text{He}$.

Altre possibili reazioni con nuclei più pesanti (come $p+6\text{Li}$, $p+11\text{B}$, $3\text{He}+3\text{He}$, $p+9\text{Be}$) hanno densità di energia ordini di grandezza inferiori alla temperatura in gioco.

L'idea di fusione polarizzata è stata introdotta negli anni ottanta [1-4]. La polarizzazione degli stati iniziali permetterebbe un aumento del rate della reazione e il controllo del flusso neutronico, con possibili benefici economici rilevanti.

Nel caso delle reazioni di sopra, l'intervallo energetico di interesse copre dai 10 keV ai 100 keV. A queste energie, nelle reazioni gemelle $3\text{He}(d,p)4\text{He}$ e $3\text{H}(d,n)4\text{He}$ il rate è dominato dalla risonanza in onda-S $J=3/2^+$ quasi pura. Utilizzando combustibile non polarizzato questo canale risonante deve competere con quello $J=1/2^+$ in accordo al peso statistico di 4 a 2. La sezione d'urto per particelle non polarizzate è data dalla somma incoerente delle varie transizioni. Con la transizione preparata nella configurazione $J=3/2$, $M=3/2$ pura, il rate della reazione aumenterebbe idealmente del 50 %.

Esistono diverse misure di queste reazioni di fusione su cui si basano le predizioni teoriche, ma gli osservabili misurati sono generalmente i più semplici e si riferiscono per lo più al caso non polarizzato o ad asimmetrie di singolo spin (analyzing powers). Per la fusione D-T si vedano i Rif. [5-13], per la fusione D-He si

vedano [13-19], per la fusione D-D in helio si vedano [12-14,20-25] e D-D in trizio si vedano [12-14,20-23,26,27]. Alcune misure considerano anche osservabili doppio polarizzati (spin correlations) [28,29], ma sono rare e coprono intervalli limitati in energia ed angolo. La presenza di misure sperimentali [16,28,29], che suggeriscono che canali diversi dal $J=3/2$ (onda S con $J=1/2$ e onde parziali superiori) danno solo piccoli contributi, rende realistica la previsione di un innalzamento della sezione d'urto con la polarizzazione degli stati iniziali. Discussioni dettagliate riguardo alla dipendenza dallo spin di queste reazioni, le sue connessioni con gli osservabili di polarizzazione e le relative ampiezze in onde-parziali possono essere trovate in Ref. [30-31].

Un aumento di un fattore 1.5 e' stato assunto nella progettazione del reattore termonucleare ARTEMIS per il rate della reazione di fusione di deuterio-elio [32].

I calcoli teorici di queste sezioni d'urto sono complicati a causa degli aspetti tipici di un problema a multi-corpi. L'accuratezza di questi calcoli non e' ben nota a causa di alcune approssimazioni utilizzate riguardo alle forze fra multi-corpi. Solo misure sperimentali dirette di queste sezioni d'urto possono dare risposte definitive con precisioni accettabili. Non e' neppure chiaro se l'innalzamento dell'electro-screening discusso recentemente per le energie molto basse [33], abbia una qualche influenza per la fusione polarizzata.

Il meccanismo delle reazioni a quattro nucleoni e' molto piu' complicato di quelle a cinque nucleoni, con 16 elementi di matrice complessi che includono onde S, P e D che contribuiscono anche a bassa energia. L'interesse per questo tipo di reazioni sta aumentando per varie ragioni. E' un importante campo di prova per calcoli teorici. Alcuni metodi di approccio si sono basati su calcoli tipo Faddeev-Yakubowski [34] o Refined Resonating Group Method, RRGM [35], altri piu' recenti si sono basati sulle teorie effettive tipo Chiral Perturbation Theory. Comunque, i progressi sono stati molto piu' lenti del caso a tre nucleoni a causa della struttura molto piu' complicata del sistema a quattro nucleoni e gli enormi problemi connessi con la soluzione del problema coloumbiano, specialmente a bassa energia. Le discrepanze fra risultati sperimentali e predizioni teoriche non risolte nel caso a tre nucleoni riappaiono anche maggiori nel caso a quattro nucleoni [36]. Gli effetti della polarizzazione a bassa energia sono maggiori nel sistema a quattro corpi come conseguenza della partecipazione di onde P e D nel canale iniziale.

E' stato suggerito che la produzione di neutroni nella reazione deuterio-deuterio potrebbe essere sostanzialmente ridotta polarizzando i deuteroni nello stato iniziale in modo da formare un quintetto ($\text{spin}=2$). Senza considerare lo stato in onda-D del deuterio, la transizione di quintetto puo' avvenire solo con uno spin-flip, mentre attraverso la componente D lo spin-flip non e' necessario. Fino ad oggi non sono disponibili misure con entrambe le particelle polarizzate nello stato iniziale. Le evidenze sperimentali indirette non sono conclusive [37,38] e una misura diretta sarebbe quindi assai importante.

Le incertezze della teoria della nucleosintesi primordiale sono dominate dall'incertezza sulle sezioni d'urto delle reazioni nucleari $d(d,n)^3\text{He}$, $d(d,p)^3\text{H}$, $d(p,\gamma)^3\text{He}$, $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$, $^3\text{He}(d,p)^4\text{He}$, alcune delle quali sono oggetto di questa proposta [39,40].

La realizzazione della fusione polarizzata potrebbe incontrare difficolta' nuove e richiedere soluzioni tecnologiche specifiche. Queste potrebbero essere individuate in preparazione di combustibile polarizzato, nella forma di un fascio intenso di atomi di trizio, deuterio o elio polarizzati o di sferette riempite di liquido o solido; iniezione del combustibile polarizzato; depolarizzazione durante l'iniezione o la accensione. Per alcune di queste questioni esistono delle valutazioni preventive [1], altre sono in via di sperimentazione [41,42].

L'interesse per questo tipo di tematiche sulla fusione polarizzata e' dimostrato dall'attivita' in corso in Giappone [32,43] e in America [41,42]. Sarebbe auspicabile che analoghe attivita' possano essere perseguite anche in Europa, per sviluppare e mantenere la competenza in un campo cosi' innovativo e strategico per la societa' futura.

Per verificare gli effetti della polarizzazione nelle reazioni di fusione di elementi leggeri e' necessario eseguire misure di correlazioni di spin. Il formalismo per una reazione fra particelle di spin-1 (e/o spin-1/2) e' piuttosto complicato, ma si semplifica se si considera lo stesso asse di polarizzazione per fascio e bersaglio (caso rilevante per la fusione) e gli stati possono essere preparati con polarizzazione vettoriale o tensoriale pura. Questo tipo di esigenza richiede competenze specifiche che sono proprie delle Unità di Ricerca afferenti al Progetto.

Il personale italiano delle Unità di Ricerca coinvolte nel progetto e' attivo da anni nello studio sviluppo di bersagli gassosi polarizzati di idrogeno e deuterio [44-48]. Questo tipo di bersagli permette di raggiungere alte polarizzazioni (intorno all'80 %), non hanno diluizione da materiale non polarizzabile a differenza dei bersagli solidi e possono invertire la polarizzazione in millisecondi. Si sottolinea che il laboratorio SpinLab dell'Università di Ferrara e' l'unico posto in Italia in grado di sviluppare una sorgente di fasci atomici polarizzati e polarimetri di diagnostica collegati. Bersagli gassosi polarizzati sono stati utilizzati con successo all'interno del fascio di elettroni HERA del DESY di Amburgo per l'esperimento HERMES, sotto la gestione del personale delle Unità [49-51]. Gli stessi bersagli sono ora utilizzati per il programma dell'esperimento PAX di polarizzazione di fasci di (anti)protoni [52-54]. Le competenze del gruppo sono completate dalla costruzione delle celle di accumulazione del gas polarizzato [55,56], dalla progettazione e test di magneti superconduttori alle temperature di utilizzo [57,58], e dalla gestione dei sistemi di vuoto e criogenia necessari in aree sperimentali (HERA, COSY, SpinLab).

I componenti stranieri dell'IKP FZ Juelich e del PNPI San Petersburg, collaborano con i gruppi di Ferrara al progetto PAX [52,54]. Sono attivamente coinvolti nella messa in opera di un bersaglio polarizzato interno all'anello COSY [59-62], hanno competenze in polarimetria di fasci [63] e hanno sviluppato un polarimetro a lambshift per il controllo della polarizzazione di bersagli atomici [64-66].

[1] R.M. Kulsrud, H.P. Furth, E.J. Valeo and M. Goldhaber, "Fusion Reactor Plasmas with Polarized Nuclei", Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1248;

[2] B.M. Schwarzschild, "Polarized plasmas may prove useful for fusion reactors", Physics Today, 35 (1982) 17;

[3] R.M. Kulsrud, Nucl. Instrum. Meth. A271 (1988) 4;

[4] Proc. RCNP Workshop on Spin Polarized Nucl. Fusion (POLUSION99), ed M. Tanaka (RCNP Osaka 1999);

[5] Allan D.L. e Poole M.J., Proc. Roy. Soc. A 204 (1950) 488;

[6] Argo H.V. et al., Phys. Rev. 87 (1952) 612;

[7] Bame S.J. Jr. e Perry J.E. Jr., Phys. Rev. 107 (1957) 1616;

[8] Brown R.E., Jarmie N. e Hale G.M., Phys. Rev. C 35 (1987) 1999;

[9] Conner J.P., Bonner T.W. e Smith J.R., Phys. Rev. 88 (1952) 468;

[10] Davidenlo V.A., Pogrebov I.S. e Saukov A.I., J. Nucl. Eng. 2 (1957) 258;

[11] Jarmie N., Brown R.E. e Hardekopf R.A., Phys. Rev. C 29 (1984) 2031;

[12] First Research Group, 1985, Chin. J. Nucl. High En. Phys. 9, 723; original article in chinese;

[13] Arnold W.R. et al., Phys. Rev. 93 (1954) 483;

[14] Krauss A. et al., "Low-energy fusion cross sections of $D + D$ and $D + ^3\text{He}$ reactions", Nucl. Phys. A 465 (1987) 150;

[15] Bonner T.W., Conner J.P., and Lillie A.B., Phys. Rev. 88 (1952) 473;

[16] W.H. Geist et al., "The $^3\text{He}(\text{polarized } d,p)^4\text{He}$ reaction at low energies", Phys. Rev. C 60 (1999) 054003;

[17] Kunz W.E., Phys. Rev. 97 (1955) 456;

[18] Moller W. e Besenbacher F., Nucl. Instrum Meth. 168 (1980) 111;

- [19] Zichang L., Jingang Y. e Xunliang D. *Chin. J. Sci. Tech. A. Energy* 3 (1977) 229;
- [20] Brown R.E. e Jarmie N., *Phys. Rev. C* 41 (1990) 1391;
- [21] Ganeev A.S. et al., *Sov. J. At. Energy Suppl.* 5 (1958) 21;
- [22] McNeill K.G. e Keyser G.M., *Phys. Rev.* 81 (1951) 602;
- [23] Preston G., Shaw P.F. e Young S.A., *Proc. Roy. Soc.* 226 (1954) 206;
- [24] Jarmie N., Brown R.E. e Hardekopf R.A., *Phys. Rev. C* 29 (1984) 2031;
- [25] Schulte R.L. et al., *Nucl. Phys. A* 182 (1972) 609;
- [26] Davenport P.A. et al., *Proc. Roy. Soc. A* 216 (1953) 66;
- [27] Gruebler W. et al., *Nucl. Phys. A* 193 (1972) 129;
- [28] Ch. Leeman et al., "Investigation of the $3\text{He}(d,p)4\text{He}$ Reaction with Polarized Beam and Target at 430 keV", *Ann. of Phys.* 66 (1971) 810;
- [29] B. Braizinha et al., "Resonant and direct components in the $3\text{He}(d,p)4\text{He}$ reaction at low-energies", *Phys. Rev. C* 69 (2004) 024608;
- [30] G.G. Ohlsen, *Rept. Progr. Phys.* 35 (1972) 717;
- [31] M.P. Rekalo e E. Tomasi-Gustafsson, "Polarization phenomena for low energy $d+3\text{He}$ collisions", *Phys. Rev. C* 57 (1998) 2870;
- [32] Y. Tomita, T. Takahashi e H. Momota, "Use of polarized helium-3 for the energy production", *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 402 (1998) 421;
- [33] A. Huke et al., "Enhancement of the Deuteron-Fusion Reactions in Metals and its Experimental Implications", *Phys. Rev. C* 78 (2008) 015803;
- [34] O.A. Yakubovsky, *Sov. J. Nucl. Phys.* 5 (1967) 937;
- [35] H.M. Hofmann e G.M. Hale, *Nucl. Phys. A* 613 (1997) 69;
- [36] M. Viviani et al., "The Ay Problem for $p-3\text{He}$ Elastic Scattering", *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 3739;
- [37] H. Paetz gen. Schieck et al., "Non-suppression of quintet states in the tensor analyzing powers of the $D+D$ fusion reactions at $E_{\text{cm}}=14$ keV", *Phys. Lett. B* 276 (1992) 290;
- [38] B. Becker et al., "Measurement of a Complete Set of Analyzing Powers of the Fusion Reactions $D(\text{polarized } d, p)3\text{H}$ and $D(\text{polarized } d, n)3\text{He}$ at $E_d=28$ keV", *Few-Body Systems* 13 (1992) 19;
- [39] R.H. Cyburt, "Primordial Nucleosynthesis for the New Cosmology: Determining Uncertainties and Examining Concordance", *Phy. Rev. D* 70 (2004) 023505.
- [40] P.D. Serpico et al., "Nuclear Reaction Network for Primordial Nucleosynthesis: a detailed analysis of rates, uncertainties and light nuclei yields", *JCAP* 0412 (2004) 010;
- [41] A. Honig, A. Sandorfi, "Experimental Test in a Tokamak of Fusion with Spin-Polarized D and 3He ", *Proc. 17th International Spin Physics Symposium (SPIN 2006)*, Kyoto, (eds. K. Imai, T. Murakami, N. Saito, K. Tanida) *AIP Conf. Proc.* 915 (2007) 1010;
- [42] A. Honig, "Evaporation of solid polarized HD and pure ortho-D₂", *AIP Conf. Proc.* 187 (1954) 1989;
- [43] M. Ilo et al., "Development of a polarized target for nuclear fusion experiments", *Nucl. Instrum. Meth. A* 526 (2004) 190.
- [44] M. Stancari et al., "Low conductance injection tubes for storage cell targets", *Nucl. Instrum. Meth. A* 594 (2008) 126;
- [45] M. Statera et al., "A high intensity superconducting atomic beam source", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15 (2005) 1164;
- [46] M. Dawn Stancari et al., "The impact of dissociator cooling on the beam intensity and velocity in the spinLab ABS", *AIP Conf. Proc.* 915 (2007) 992;
- [47] M. Stancari et al., "Estimates of intra-beam scattering in atomic beam sources", Published in *Trieste/Mainz 2004, SPIN 2004;
- [48] S.N. Atutov et al., "Optical spectrometer for measuring the ratio of atomic hydrogen and molecular hydrogen in an ABS", Published in *Trieste/Mainz 2004, SPIN 2004;
- [49] A. Airapetian et al., "The HERMES polarized hydrogen and deuterium gas target in the HERA electron storage ring", *Nucl. Instrum. Meth. A* 540 (2005) 68;
- [50] A. Airapetian et al., "Nuclear polarization of molecular hydrogen recombined on a non-metallic surface", *Eur. Phys. J. D* 29 (2004) 21;
- [51] C. Baumgarten et al., "A gas analyzer for the internal polarized target of the HERMES experiment", *Nucl. Instrum. Meth. A* 508 (2003) 268;
- [52] V. Barone et al., "Antiproton-proton scattering experiments with polarization", eprint archive: hep-ex/0505054;
- [53] F. Rathmann et al., "A Method to polarize stored antiprotons to a high degree", *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 014801;
- [54] A. Kacharava et al., "Proposal for the spin physics from COSY to FAIR: A Proposed programme for polarisation experiments in the COSY ring which could open way to a polarised antiproton facility at FAIR", eprint archive: nucl-ex/0511028;
- [55] C. Baumgarten et al., "The storage cell of the polarized H/D internal gas target of the HERMES experiment at HERA", *Nucl. Instrum. Meth. A* 496 (2003) 277;
- [56] C. Baumgarten et al., "Measurements of atomic recombination in the HERMES polarized hydrogen and deuterium storage cell target", *Nucl. Instrum. Meth. A* 496 (2003) 263;
- [57] M. Statera et al., "The Field Mapping at Low Temperature of a NbTi Setupole", in *CRYOPRAGUE 2006 Proc. of ICMC '06, ICARIS Ltd* 2 (2007) 199;
- [58] M. Statera et al., "A test bench for small multipolar magnets for a high-intensity superconducting atomic beam source", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 16 (2006) 297;
- [59] R. Engels et al., "First experiments with the polarized internal gas target (PIT) at ANKE/COSY", *AIP Conf. Proc.* 980 (2008) 161;

- [60] K. Grigoryev et al., "The polarized internal target at ANKE: First results", AIP Conf. Proc. 915 (2007) 979;
- [61] H. Kleines et al., "The control system of the polarized internal target of ANKE at COSY", Nucl. Instrum. Meth. A 560 (2006) 503;
- [62] K. Grigoryev et al., "Beam-profile measurements for the development of storage cells at the ANKE facility of COSY", e-print arXiv:0805.2008;
- [63] D. Chiladze et al., "Determination of deuteron beam polarizations at COSY", Phys. Rev. ST Accel. Beams 9 (2006) 050101;
- [64] R. Engels et al., "Background reduction by a getter pump around the ionization volume of a Lamb-shift polarimeter and possible improvements of polarized ion sources", Rev. Sci. Instrum. 76 (2005) 053305;
- [65] R. Engels et al., "A precision Lamb-shift polarimeter for the polarized gas target at ANKE/COSY", AIP Conf. Proc. 675 (2003) 897;
- [66] R. Engels et al., "A New Application of a Lamb-shift Polarimeter", AIP Conf. Proc. 980 (2008) 255.

13 - Descrizione della Ricerca

Non e' ancora chiaro se calcoli realistici (Faddeev-Yakubowski oppure Chiral Perturbation Theory + Coulomb) saranno disponibili alle energie rilevanti per la fusione e le questioni astrofisiche. In virtu' di questo e' fondamentale ottenere misure dirette delle correlazioni in spin in reazioni di fusione fra nuclei leggeri, ad esempio quantificare il grado di soppressione della transizione di quintetto del deuterio-deuterio. Il presente progetto si propone di realizzare una facility sperimentale per la realizzazione di tali misure.

Sebbene previste nel passato, queste misure non sono ancora state effettuate, perche' la loro realizzazione incontra grandi difficolta'. Il problema principale e' la bassa sezione d'urto. L'uso di bersagli di deuterio solidi e' complesso [1-3]. Ha lo svantaggio della contaminazione da prodotti dagli altri nuclei costituenti il bersaglio. Inoltre, a causa della bassa energia, difficilmente i prodotti della reazione raggiungerebbero il rivelatore esterno al bersaglio.

La soluzione proposta consiste nell'uso di due fasci polarizzati di alta intensita' che collidano in una regione di interazione circondata da rivelatori per i prodotti della reazione.

Il fascio bersaglio puo' essere generato da una sorgente di fasci atomici polarizzati (ABS: Atomic Beam Source). La sorgente si compone di un dissociatore del gas molecolare e di una linea di fascio atomico in grado di selezionare gli stati iperfini attraverso separazione di Stern-Gerlach e transizioni indotte da cavita' a radiofrequenza. Questo tipo di sorgenti e' in uso da lungo tempo, ha dimostrato grande affidabilita' e stabilita' insieme alla capacita' di ottenere alte polarizzazioni (intorno all'80 %) e di un preciso controllo delle sistematiche (dell'ordine del 3 %). Alcuni esempi sono la sorgente usata come polarimetro del fascio di protoni di alta energia (100-500 GeV) a RHIC, BNL, USA [4] e la sorgente utilizzata nel bersaglio dell'esperimento HERMES, all'interno dell'anello di elettroni HERA di DESY, Amburgo [5] gestita dal 2000 sotto la responsabilita' dal personale afferente a questo Progetto di Ricerca. L'ABS di HERMES e' stato aggiornato ed e' attualmente operativo al COSY, Juelich per essere utilizzato in esperimenti di polarizzazione di fasci di protoni (antiprotoni) secondo il programma della collaborazione PAX [6].

Il fascio incidente puo' essere ottenuto ionizzando il fascio atomico di una seconda ABS. La successiva accelerazione in un campo elettrostatico prima del punto di interazione definisce l'energia della reazione. Una alternativa consiste nell'utilizzare una sola ABS, ionizzare il fascio bersaglio dopo il passaggio nella zona di interazione, accelerarlo e farlo ricircolare in modo da intersecare perpendicolarmente il fascio bersaglio nella regione di interazione. In ogni modo lo schema a due sorgenti offre maggiore flessibilita' nella gestione delle ottiche di fascio e della manipolazione dello spin e probabilmente anche una maggiore luminosita'. I conteggi previsti sono relativamente bassi, dell'ordine di 1 ogni 100 secondi, per cui si richiede una stabilita' a lungo termine dell'apparato e misure automatizzate, in grado di triggerare e selezionare gli eventi di interesse da quelli di fondo.

Le quantita' da misurare sono le distribuzioni angolari dei termini di correlazione in spin della sezione d'urto differenziale con diverse combinazioni dei tre possibili stati di spin di entrambi i fasci. I termini di singola polarizzazione del fascio bersaglio o del fascio incidente (detti analyzing powers) sono parte della sezione d'urto e vanno anch'essi misurati o ripresi da dati gia' disponibili. E' fondamentale per la flessibilita' e semplicita' di misura che le sorgenti permettano di ottenere fasci con polarizzazione vettoriale o tensoriale pure e che sia possibile orientare la direzione di polarizzazione lungo una qualsiasi direzione, per esempio con deflessione elettrostatica del fascio o con campi magnetici (precessione di spin).

Per la rivelazione dei prodotti di reazione, i rivelatori piu' adatti sono quelli al silicio, collocati intorno alla regione di interazione in modo da avere una buona copertura dello spazio delle fasi disponibile per la reazione. I rivelatori al silicio possono lavorare in vuoto e quindi rivelare particelle di bassa energia. Essi permettono di tracciare i prodotti di reazione, di misurarne l'energia cinetica (se fermati all'interno del silicio) e di identificare gli isotopi dal confronto fra energia depositata e energia cinetica. Se equipaggiati con una elettronica dedicata, sono in grado di generare il trigger senza l'utilizzo di rivelatori esterni (ad esempio scintillatori). Esempi sono dati dai telescopi in sviluppo a Juelich costituito da tre strati di diverso spessore di silicio (70, 300 e 5000 micron) [7] e silici utilizzati in fisica nucleare [8,9].

La polarizzazione di entrambi i fasci deve essere misurata e monitorata nel tempo. Per il fascio atomico e' previsto l'utilizzo del polarimetro a Lambshift operato a Juelich [10,11]. Per il fascio ionico incidente e' possibile utilizzare le stesse reazioni di bassa energia, come $2H(d,p)3H$, $2H(d,n)4He$ o $3He(d,p)4He$, il cui analyzing power sia stato misurato precedentemente.

La creazione di una facility sperimentale per la misura di sezioni d'urto di fusione polarizzata fra nuclei leggeri e' un progetto complesso che vede coinvolti piu' gruppi di ricerca. In particolare il presente progetto prevede la collaborazione fra quattro Institui europei, di cui due italiani.

Il Petersburg Nuclear Physics Institute Academy of Sciences, Gatchina, Russia ha la responsabilita' della sorgente ionica per il fascio incidente insieme al sistema di accelerazione degli ioni fino ad energie di 100 keV e offre i propri locali per l'installazione della facility. L'Institut fur Kernphysick del laboratorio Forschungszentrum Jülich mette a disposizione un polarimetro a lambshift per la misura della polarizzazione del fascio atomico. Queste attivita' sono gia' state in larga parte finanziate.

L'Universita' di Ferrara, ha la responsabilita' di approntare una sorgente atomica per il fascio bersaglio, aggiornando quella in uso nel laboratorio SpinLab della stessa Universita'. L'INFN, Sezione di Ferrara, contribuira' all'allestimento del rivelatore al silicio e relativa elettronica di lettura come ulteriore applicazione dello sviluppo in atto con l'IKP di Juelich del tracciatore di (anti)protoni e deuteroni per esperimenti di polarizzazione di fasci.

- [1] A. Honig et al., "Large, accessible, highly polarized frozen-spin solid HD targets", AIP Conf. Proc. 343 (1995) 513;
- [2] M. Ilo et al., "Development of a polarized target for nuclear fusion experiments", Nucl. Instrum. Meth. A526 (2004) 190;
- [3] J. Ball et al., "First results of the large COMPASS 6LiD polarized target", Nucl. Instrum. Meth. A 498;
- [4] H. Okada et al., "Absolute polarimetry at RHIC", AIP Conf. Proc. 980 (2008) 379;
- [5] A. Airapetian et al., "The HERMES Polarized Hydrogen and Deuterium Gas Target in the HERA Electron Storage Ring", Nucl. Instr. and Meth. A540 (2005) 68;
- [6] A. Nass et al., "The Polarized Target for Spin Filtering Studies at COSY and AD", AIP Conf. Proc. 915 (2007) 1002;
- [7] R. Schleichert et al., "A self-triggering silicon-tracking telescope for spectator proton detection", IEEE Trans. Nucl. Sci. 50 (2003) 301;
- [8]

[9]

[10] R. Engels et al., "A New Application of a Lamb-shift Polarimeter", AIP Conf. Proc. 980 (2008) 255;

[11] R. Engels et al., "A Precision Lamb-shift Polarimeter for the Polarized Gas Target at ANKE/COSY", AIP Conf. Proc. 675 (2003) 897;

14 - Riassunto Spese delle Unità di Ricerca

n°	Responsabile Scientifico (codice)	Spesa A.1.1	Spesa A.1.2	Spesa A.2	Spesa B	Spesa C.1	Spesa C.2	Spesa D	Spesa E	Spesa F	Spesa G	TOTALE
1.	CONTALBRIGO Marco	55.635	0	48.800	62.661	0	0	32.700	18.990	0	0	218.786
2.	PAPPALARDO Luciano Libero	80.001	0	0	156.001	180.000	0	12.168	18.500	0	0	446.670
	TOTALE	135.636	0	48.800	218.662	180.000	0	44.868	37.490	0	0	665.456

15 - Informazioni generali e durata del progetto

Durata del Progetto di Ricerca	48 Mesi
Mesi uomo complessivi dedicati al Progetto di Ricerca	178
Costo totale del Progetto	665.456
Finanziamento richiesto	339.819
Numero di contratti almeno triennali per giovani ricercatori	1
Costo totale	180.000
Numero di contratti per ricercatori di chiara fama	0
Costo totale	0

16 - Costo complessivo della Progetto di Ricerca risorse disponibili

n°	Responsabile Scientifico (codice)	Risorse finanziarie richieste al MIUR	Giovani ricercatori	Ricercatori di chiara fama internazionale	Costo totale della proposta progettuale
1.	PAPPALARDO Luciano Libero	186.669	180.000	0	446.670
2.	CONTALBRIGO Marco	153.150	0	0	218.786
	TOTALE	339.819	180.000	0	665.456

	A carico del MIUR	A carico del Proponente	TOTALE
Costo delle attività di ricerca	339.819	145.637	485.456
Costo dei contratti almeno triennali (giovani ricercatori)	180.000		180.000
Costo dei contratti (ricercatori di chiara fama)	0		0
Costo complessivo della Progetto di Ricerca	519.819	145.637	665.456

Si ricorda che il cofinanziamento a carico del proponente deve essere pari al 30% del costo complessivo della proposta progettuale, detratti i costi dei contratti almeno triennali per giovani ricercatori e per ricercatori di chiara fama, che sono finanziati al 100%.

I dati contenuti nella domanda di finanziamento sono trattati esclusivamente per lo svolgimento delle funzioni istituzionali del MIUR. Incaricato del trattamento è il CINECA- Dipartimento Servizi per il MIUR. La consultazione è altresì riservata al MIUR - D.G. della Ricerca -- Ufficio IV, alla Commissione FIRB e ai referee scientifici. Il MIUR potrà anche procedere alla diffusione dei principali dati economici e scientifici relativi ai progetti finanziati. Responsabile del procedimento è il dirigente dell'ufficio IV della D.G. della Ricerca del MIUR.

Certifico, sotto la mia personale responsabilità, di aver ottenuto regolare autorizzazione dal rappresentante legale dell'ente di mia appartenenza, nonchè degli enti di tutte le altre Unità di Ricerca.

Firma del Coordinatore

Data..... (inserita dal sistema al termine della redazione della domanda)